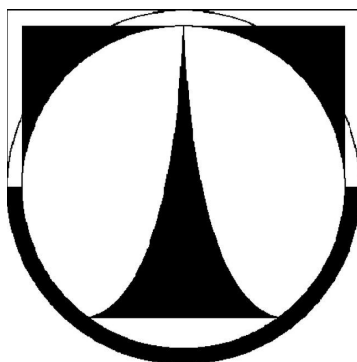


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta strojní  
Katedra materiálů



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Nedestruktivní hodnocení změn struktury ocelí**

**Nondestructive evaluation of changes in the structure  
of steel**

Liberec 2013

Tomáš Blažek

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta strojní  
Katedra materiálu

Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie  
Zaměření: Materiálové inženýrství

## **Nedestruktivní hodnocení změn struktury ocelí**

### **Nondestructive evaluation of changes in the structure of steel**

**KMT – B – 201**

**Tomáš Blažek**

Vedoucí práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.  
Konzultant: Ing. Totka Bakalova, Ph.D.

Počet stran: 72  
Počet tabulek: 32  
Počet obrázků: 42  
Počet grafů: 12  
Počet příloh: 3

Datum: 24.5.2013



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	<b>Tomáš BLAŽEK</b>
studijní program	<b>B 2341 Strojírenství</b>
obor	<b>3911R018 Materiály a technologie</b>
zaměření	<b>Materiálové inženýrství</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

### **Nedestruktivní hodnocení změn struktury ocelí**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s problematikou nedestruktivního hodnocení vnitřní struktury materiálu.
2. Navrhněte vhodnou metodiku studia struktury ocelí pomocí Barkhausenova šumu.
3. Ověřte platnost naměřených hodnot pomocí další nedestruktivní metody.
4. Diskutujte dosažené výsledky a formulujte závěry.



Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 25 - 40 stran
- přílohy


Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

1. Kopec Bernard a kol.: Nedeštruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno 2008
2. Skrbek Břetislav: Metoda magnetické skvrny, Teze profesorské přednášky, Liberec 2008

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.  
Konzultant bakalářské práce: Ing. Totka Bakalová, Ph.D.



  
prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Miroslav MALÝ, CSc.  
děkan

V Liberci dne 30.10.2012

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedeném lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



## **Anotace**

Tématem této bakalářské práce je „Nedestruktivní hodnocení změn struktury ocelí“. Cílem je aplikovat metodu analýzy Barkhausenova šumu k rozlišení různých struktur po tepelném zpracování u oceli ČSN 14 260 (EN 54SiCr6). Takto dosažené výsledky pak porovnat s jinou nedestruktivní strukturoskopickou metodou, v tomto případě metodou magnetické skvrny. Výsledkem práce je posouzení vhodnosti metody Barkhausenova šumu k rozlišení rozdílných strukturních stavů ocelí.

## **Klíčová slova**

Barkhausenův šum, magnetická skvrna, struktura oceli, tepelné zpracování

## **Annotation**

The bachelor's thesis topic is "Nondestructive evaluation of changes in the structure of steel". The aim is to apply method of analysis of Barkhausen noise to distinguish different structures after heat treatment of steel EN 54SiCr6 (ČSN 14 260). These results were compared with other non-destructive structuroscopic method, in this case, the method of magnetic spot. Result of this work is to assess the suitability of the method of Barkhausen noise to distinguish the different structural states of steel.

## **Keywords**

Barkhausen noise, magnetic spot, structure of steel, heat treatment

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl velmi poděkovat Ing. Totce Bakalové, Ph.D. za veškerou pomoc a rady při tvorbě bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Lucii Vrkoslavové za pomoc při měření a veškeré odborné informace o Barkhausenovu šumu. V neposlední řadě pak děkuji doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za rady a pomoc při měření magnetické skvrny, dále pak Ing. Davidu Pospíšilovi a Ing. Václavu Kubíčkovvi za pomoc při praktické části této práce.

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Klasifikace nedestruktivních metod.....</b>	<b>11</b>
2.1 Nedestruktivní metody.....	11
2.2 Nejčastěji užívané metody NDT.....	12
2.2.1 Vizuální metoda.....	12
2.2.2 Kapilární zkoušky.....	12
2.2.3 Magnetická prášková metoda.....	13
2.2.4 Hledání netěsností.....	13
2.2.5 Metoda vířivých proudů.....	14
2.2.6 Zkoušky prozařováním.....	14
2.2.7 Ultrazvukové metody.....	15
2.2.8 Metoda akustické emise.....	16
<b>3. Nedestruktivní hodnocení struktury materiálů.....</b>	<b>17</b>
3.1 Strukturní parametry určované útlumem ultrazvukových vln.....	17
3.1.1 Velikost útlumu.....	17
3.1.2 Absorpce.....	18
3.1.3 Rozptyl.....	18
3.1.4 Měření velikosti útlumu.....	19
3.1.5 Stanovení velikosti zrna struktury.....	20
3.1.6 Další strukturní parametry závislé na útlumu ultrazvuku.....	21
3.2 Magnetické a elektromagnetické strukturoskopické metody.....	22
3.2.1 Měření hysterezních křivek feromagnetických materiálů.....	23
3.2.1.1 Měření na uzavřených vzorcích.....	24
3.2.1.2 Měření na otevřených vzorcích.....	25
3.2.1.3 Digitalizace měření magnetizačních charakteristik.....	25
3.2.2 Měření koercitivity.....	26
3.2.3 Vliv tvaru součásti na pokles informace.....	26
3.2.4 Principy magnetických strukturoskopických metod.....	27
3.2.4.1 Principy se stejnosměrným nebo kvazistatickým magnetickým polem.....	27
3.2.4.2 Principy se střídavým magnetickým polem.....	30

3.2.5 Vyhodnocování naměřených hodnot.....	31
<b>4. Analýza Barkhausenova šumu a metoda magnetické skvrny.....</b>	<b>32</b>
4.1 Metoda analýzy Barkhausenova šumu.....	32
4.1.1 Fenomenologický popis jevu.....	33
4.1.2 Útlum Barkhausenova šumu.....	34
4.1.3 Parametry ovlivňující signál Barkhausenova šumu.....	35
4.1.3.1 Zbytková napětí.....	35
4.1.3.2 Metalurgická struktura.....	37
4.1.4 Praktické využití magnetoelastické metody Barkhausenova šumu.....	40
4.2 Metoda magnetické skvrny.....	41
4.2.1 Princip metody magnetické skvrny.....	41
<b>5. Experimentální část.....</b>	<b>42</b>
5.1 Charakteristika hodnocené oceli 14 260 (54SiCr6).....	43
5.2 Tepelné zpracování vzorků.....	46
5.3 Příprava metalografických výbrusů a studium struktury.....	47
5.4 Měření tvrdosti vzorků.....	49
5.5 Měření Barkhausenova šumu.....	50
5.6 Měření metodou magnetické skvrny.....	52
<b>6. Diskuze výsledků a jejich shrnutí.....</b>	<b>56</b>
<b>7. Závěr.....</b>	<b>58</b>
<b>8. Literatura.....</b>	<b>59</b>

## Seznam příloh

**PŘÍLOHA 1: Měření tvrdosti a mikrotvrdosti**

**PŘÍLOHA 2: Měření intenzity Barkhausenova šumu**

**PŘÍLOHA 3: Seznam použitých přístrojů a zařízení**

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<b>NDT</b>	<i>Nedestruktivní zkoušení</i>	<b><math>\mu\text{m}</math></b>	<i>Mikrometr</i>
<b>MT</b>	<i>Zkoušení mag. metodou práškovou</i>	<b>N</b>	<i>Newton</i>
<b>PT</b>	<i>Zkoušení kapilární metodou</i>	<b><math>H_r</math></b>	<i>Intenzita zbytkového mag.</i>
<b>ET</b>	<i>Zkoušení vířivými proudy</i>		<i>pole</i>
<b>LT</b>	<i>Zkoušení netěsnosti</i>		
<b>RT</b>	<i>Radiografické zkoušení</i>		
<b>VT</b>	<i>Vizuální zkoušení</i>		
<b>UT</b>	<i>Zkoušení ultrazvukem</i>		
<b>AE</b>	<i>Metoda akustické emise</i>		
<b>B</b>	<i>Magnetická indukce</i>		
<b>H</b>	<i>Intenzita magnetického pole</i>		
<b><math>B_s</math></b>	<i>Indukce nasycení</i>		
<b><math>B_R</math></b>	<i>Remanence</i>		
<b><math>H_c</math></b>	<i>Koercitivita</i>		
<b><math>P_h</math></b>	<i>Měrné ztráty</i>		
<b>MP</b>	<i>Magnetoelastický parametr</i>		
<b>°C</b>	<i>Stupeň Celsia</i>		
<b>HV</b>	<i>Tvrdost podle Vickerse</i>		

# 1. Úvod

S rozvojem strojírenského průmyslu a inovací technologií roste požadavek na kvalitu, spolehlivost a životnost dílů. Všechny tyto parametry jsou velmi důležité u konstrukčních dílů v produktivních odvětvích průmyslu. Vysoká kvalita výrobků nám umožňuje vytvářet bezpečnější prostředí a chránit tak člověka před neštěstím a katastrofami. Příkladem mohou být díly automobilového a leteckého průmyslu či součásti pro jadernou energetiku, kde jsou na jakost materiálu kladeny z důvodů bezpečnosti velmi vysoké nároky.

Na vyráběnou součást působí řada různých vlivů již od počátku její výroby. Například výchozí materiál, zvolená technologie, stav strojů a řada osobních i přírodních faktorů. V důsledku nežádoucích vlivů ztrácí součást na kvalitě a nutností výrobce je takovéto součásti odhalit. Abychom tedy zaručili vysokou kvalitu, musíme vyrobené díly prověřovat důkladným a spolehlivým způsobem kontroly.

Strukturní stav výrobku lze prověřit dvěma způsoby, destruktivní a nedestruktivní kontrolou. V prvním případě se z výrobku vyhotoví metalografický výbrus a struktura je zkoumána pomocí mikroskopie. Tato metoda sice podává přesné výsledky, ale je záležitostí materiálových laboratoří. Příprava a analýza vzorku trvá déle, a proto není metoda vhodná pro získání okamžitých výsledků v provozu výroby. Právě díky vysoké produktivitě v oblasti hodnocení jakosti výrobků má v dnešní době nezastupitelnou roli v průmyslu nedestruktivní kontrola materiálů.

Pro metody nedestruktivního zkoušení a určování vnitřní struktury materiálů jsou základem poznatky různých fyzikálních jevů a zákonitostí. Využívá se zde například šíření ultrazvukových vln, rentgenového záření nebo magnetických a elektrických vlastností látek. Spolu s těmito fyzikálními poznatky a mohutným rozvojem elektroniky tak do rukou dostáváme stále kvalitnější zkušební přístrojovou techniku. Můžeme tak odhalit řadu okem nezjistitelných vad skrytých v součásti či stanovit strukturní stav materiálu. To vše, aniž by došlo k porušení celistvosti celého výrobku.

## 2. Klasifikace nedestruktivních metod

U nedestruktivního hodnocení (NDT) máme tu výhodu, že výrobek zůstane po prověření nepoškozen a nemění se jeho užité vlastnosti. Nedestruktivní zkoušení se používá pro zjišťování vad, jako jsou trhliny, dutiny, vměstky a jiné nesouvislosti v materiálu. NDT však není omezeno pouze k zjišťování vad, ale slouží také k určování struktury, zbytkového napětí, tvrdosti či výkyvů ve struktuře a je tedy významné i z hlediska materiálového inženýrství. K hodnocení struktury se nejčastěji používá prozařování nebo vyhodnocování zvukových signálů. Obory NDT jsou:

- **Defektoskopie** - obor, který nedestruktivním způsobem analyzuje vnitřní vady výrobku.
- **Strukturoskopie** - kvantifikuje vztah mezi fyzikální nedestruktivně měřenou veličinou a mechanickou vlastností, složením, metalografickým parametrem struktury nebo napětím [9].

### 2.1 Nedestruktivní metody

Jednotlivé nedestruktivní metody jsou rozdílné ve fyzikálních principech, používaných přístrojích a v druhu detekovaných dat a jejich vyhodnocování. Každá z metod je používána pro specifické druhy zjišťovaných vad a parametrů. Dále jsme též omezeni druhem zkoušeného materiálu a jeho vlastnostmi (magnetické vlastnosti, elektrická vodivost atd.). Rozdílné metody jsou využívány k zjišťování vad povrchových a vnitřních. Každá z metod má tedy své hranice použitelnosti a neexistuje univerzální metoda, která by umožňovala zjištění všech požadovaných parametrů. Ke kompletnímu vyhodnocení součásti je potřeba kombinace různých metod. Kategorie metod NDT a zjišťované parametry jsou uvedeny v tabulce 2.1.



Tabulka 2.1: Kategorie metod NDT a zjišťované parametry [1]

KATEGORIE	OBJEKT ZJIŠTĚNÍ
Mechanické a optické	Trhliny, povrchové vady, průchozí trhliny, jakost povrchu, rozměry, odrazivost, barva
Pronikavé záření	Trhliny, hustota a chemická kolísání, rozdělování prvků, vměstky, mikroskopická pórovitost, segregace, smrštění, dutiny, tloušťka
Elektromagnetické a elektronické	Obsah slitiny, anizotropie, dutiny, místní napětí, tvrdost, kompozice, kontaminace, koroze, praskliny, hloubka trhliny, krystalická struktura, tepelné zpracování, elektrická vodivost, trhliny, vměstky, iontová koncentrace, napětí mřížky krystalu, tloušťka vrstvy, vlhkost, polarizace, segregace, smrštění, stav vulkanizace, pevnost v tahu, tloušťka, narušitel vazby
Zvukové a ultrazvukové	Iniciace a šíření trhlín, dutiny, útlumový faktor, stupeň vytvrzování, stupeň impregnace, stupeň slinování, hustota, rozměry, modul pružnosti, velikost zrna, vměstky, mechanická degradace, pórovitost, degradace záření, struktura kompozic, povrchové napětí, pevnost v tahu, smyku, stříhu a tlaku, opotřebení, mezilamelární vzdálenost perlitu, mez únavy, narušitel vazeb
Infračervené a termální	Anizotropie, spoje, kompozice, emisní schopnost, tepelné hranice, tloušťka pokovování, pórovitost, tloušťka, dutiny, trhliny, štěpení, tepelné zpracování, stav vulkanizace, vlhkost, koroze
Chemické a analytické	Identifikace slitiny, kompozice, trhliny, analýza a rozdělení prvků, zrnitost, vměstky, makrostruktura, pórovitost, segregace, povrchové anomálie

## 2.2 Nejčastěji užívané metody NDT

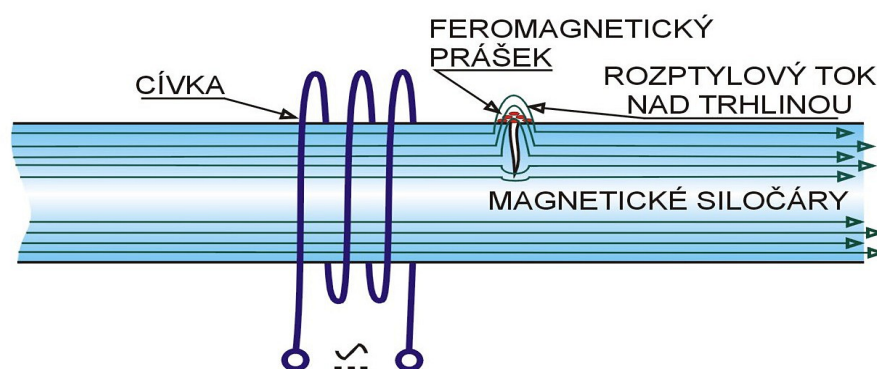
**2.2.1 Vizuální metoda** – slouží k zjištění a posouzení makroskopických vad na povrchu materiálu. Kontrola se provádí pouhým zrakem, nebo za užití optických pomůcek (lupa, zrcadlo, endoskop, přístroje s optickými vlákny atd.)

**2.2.2 Kapilární zkoušky** – jsou určeny pro vizuální zjišťování povrchových vad. Zkoušený povrch se pokryje kapalinou s nízkým povrchovým napětím (penetrant), který vyplní povrchové vady. Přebytek penetrantu se odstraní a nanese se barevná nebo fluorescenční indikační kapalina (vývojka). Vlivem vztlakovosti penetrantu v povrchových vadách dochází k indikaci vady pomocí vývojky.



Obr. 2.1: Princip kapilární zkoušky [2]

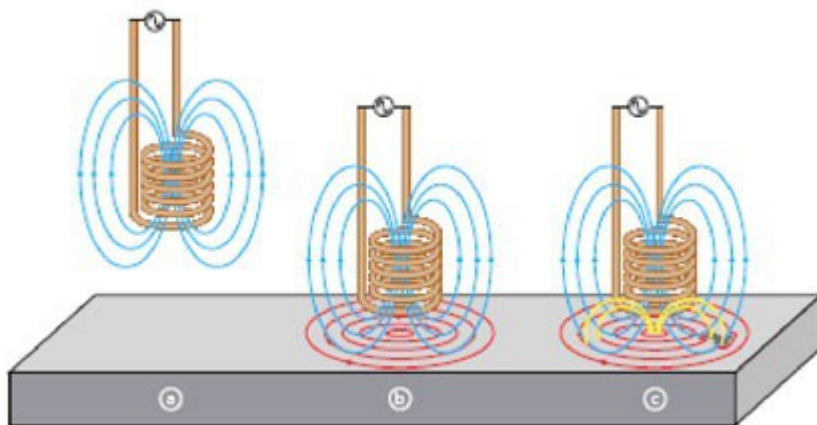
**2.2.3 Magnetická prášková metoda (rozptylových toků)** - je založena na hledání rozptylových magnetických polí vytvořených nad povrchovými vadami. Zkoušený feromagnetický materiál se zmagnetizuje a v místě trhliny se vytvoří magnetický rozptylový tok vystupující z materiálu nad jeho povrch. Indikace tohoto toku se provádí buď magnetickým práškem, nebo sondami. [1]



Obr. 2.2: Princip magnetické práškové metody [3]

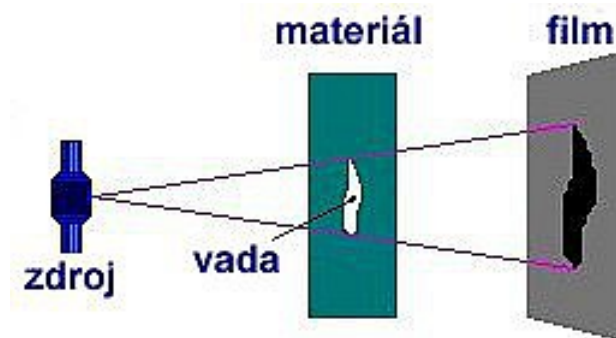
**2.2.4 Hledání netěsností** – obor se zabývá netěsnostmi způsobujícími úniky plynů, par a kapalin z hermeticky uzavřených systému jako např. plynová potrubí, armatury, nádrže, zásobníky plynů apod. Existuje několik metod, jejichž volba závisí na velikosti netěsnosti, kterou potřebujeme najít. Mezi užívané metody patří například akustická, penetrační a kolorimetrická metoda, dále zkouška bublinková, metoda měření tlaku za čas, metoda s aplikací zkušebního plynu. Zkoušení jsou zaměřena na vyhledání polohy netěsností, určení jejich velikosti, případně na polohu a velikost současně. [1]

**2.2.5 Metoda vířivých proudů** – slouží k indikaci povrchových vad elektricky vodivých materiálů a kontrole strukturního stavu materiálu. Zkoušený předmět je vystaven působení střídavého magnetického pole, vytvořeného budicí cívkou, napájenou střídavým elektrickým proudem (Obr. 2.3a). V materiálu výrobku se indukují vířivé proudy (Obr. 2.3b), které zpětně působí na původní, budicí magnetické pole (Obr. 2.3c). Obě tato magnetická pole se vektorově skládají ve výsledné pole, které je závislé na elektrické vodivosti a magnetické permeabilitě zkoušeného předmětu. V měřicím vinutí snímače se indukuje napětí ovlivněné magnetickými a elektrickými parametry zkoušeného předmětu. Přítomnost defektu přerušuje část drah vířivých proudů, takže jejich zpětný účinek na budicí pole se změní. Stejně tak strukturní stav materiálu změní uvedené magnetické a elektrické parametry. [1]



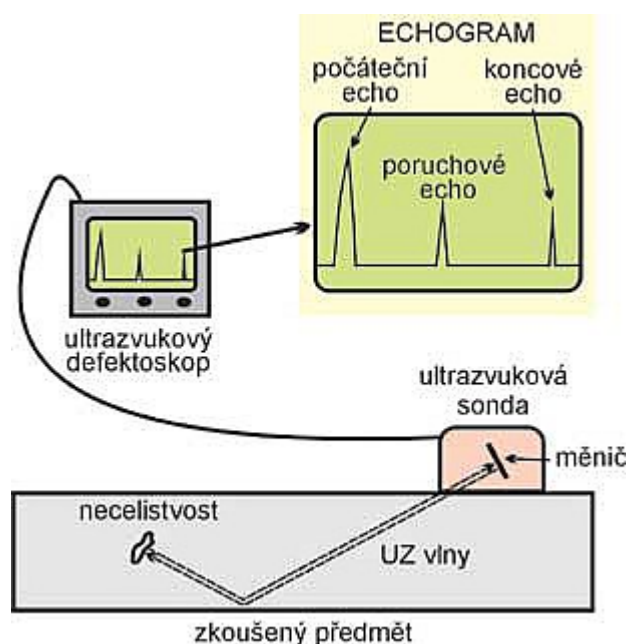
*Obr. 2.3: Princip metody vířivých proudů [4]*

**2.2.6 Zkoušky prozařováním** – při těchto zkouškách je materiál prozařován rentgenovým nebo gama zářením. Záření procházející materiálem je zeslabováno v závislosti na tloušťce a chemickém složení materiálu. V prozařovaných místech s vadou dochází k rozdílnému zeslabení oproti místům bez vady. Důvodem je rozdílné pohlcování ionizačního záření. Z následného zviditelnění prošlého záření detektorem (radiografickým filmem) lze stanovit místa s vadou, ve kterých je záření pohlcováno méně (na detektoru se jeví jako tmavá místa).



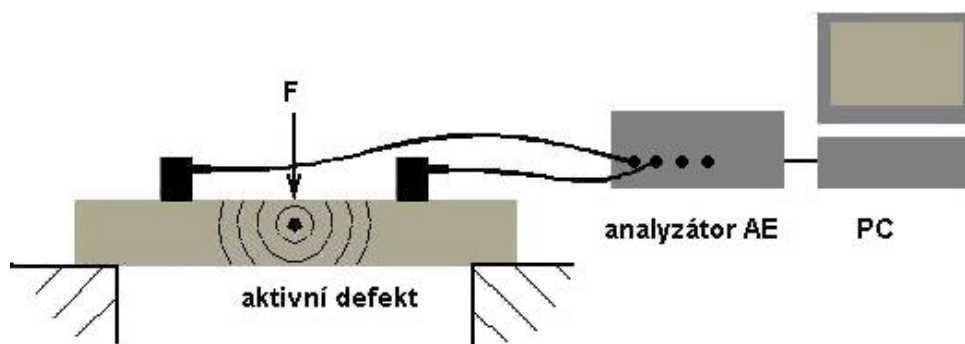
Obr. 2.4: Princip zkoušky prozařováním [5]

**2.2.7 Ultrazvukové metody** – využívají povrchově citlivých vln (Rayleighovy a příčné s horizontální polarizací). Pro buzení a detekci akustické energie slouží nejčastěji piezoelektrické nebo magnetostrikční ultrazvukové sondy. Ultrazvuk podává informace o přítomnosti, poloze, popř. i velikosti defektu a je univerzální z hlediska zkoumaného materiálu, neboť není nutné, aby materiál byl elektricky nebo magneticky vodivý [6]. Rozlišujeme metodu průchodovou, která vyžaduje dvě sondy umístěné proti sobě tak, že jedna slouží jako vysílač vlnění a druhá přijímá jeho část prošlou materiálem. Odrazová metoda je založena na zjišťování odrazů od vad v materiálu, sonda tedy slouží jako vysílač i přijímač zároveň. Obě uvedené metody mají několik variant, které se liší především uspořádáním sond. [1]



Obr. 2.5: Princip odrazové metody zkoušky ultrazvukem [7]

**2.2.8 Metoda akustické emise** – zatímco předchozí zmiňované NDT metody zjišťují přítomnost či geometrii vady, metoda akustické emise detekuje a charakterizuje rozvoj procesu. Pracuje na základě „odposlechu“ akustické aktivity emitované procesem probíhajícím v materiálu (plastická deformace, iniciace a rozvoj porušení, svírání a rozevírání trhlin, únik média přes průchozí trhlinu). Pro měření se obvykle využívá více snímačů rozmístěných na tělese tak, že tvoří měřicí síť pokrývající měřený objekt. Metoda má široké uplatnění v oblasti provozních kontrol strojů, zařízení a konstrukcí, ale i v aplikaci při monitorování technologických procesů (chladnutí svarů a odlitků, obrábění). [1]



Obr. 2.6: Princip detekce akustické emise [8]

Shrnutí jednotlivých NDT metod a jejich hlavní uplatnění je uvedeno v tab. 2.2

Tabulka 2.2: Shrnutí metod a jejich hlavní uplatnění [9]

Zkratka metody	Druh metody	Hlavní uplatnění
MT	Magnetická prášková	povrchové vady feromagnetických výrobků
PT	Kapilární	povrchové otevřené vady všech materiálů
ET	Vířivých proudů	povrchové vady všech el. vodivých materiálů
LT	Hledání netěsností	zkoušky propustnosti stěn
RT	Radiografická	vnitřní objemové vady, RTG difrakce
VT	Vizuální	stavy a vady povrchů
UT	Ultrazvuková	vnitřní vady plošné i objemové
AE	Akustická emise	dynamika a topografie vad, strukturních stavů

### 3. Nedestruktivní hodnocení struktury materiálů

Pomocí nedestruktivních strukturoskopických metod je možno zjišťovat celou řadu parametrů týkajících se struktury materiálu. Například strukturu po tepelném zpracování, velikost zrna ve feriticko-perlitické oceli, výskyt Widmannstättenovy struktury, řádkovité struktury a u některých ocelí dokonce i mezilamelární vzdálenost perlitu. Každá z metod pracuje na jiném principu a potřebné parametry se zjišťují jiným způsobem. Významné zastoupení v průmyslu má především magnetická a ultrazvuková strukturoskopie. Například u ultrazvukové metody je struktura hodnocena na základě útlumu ultrazvukových vln. Magnetické metody jsou vhodné k určování vnitřní struktury, nebo stavu povrchových vrstev podle zbytkového napětí a tvrdosti.

#### 3.1 Strukturní parametry určované útlumem ultrazvukových vln

Zjišťování vnitřní struktury oceli, zejména velikosti zrn se provádí též pomocí ultrazvukové metody. Základem ultrazvukové strukturoskopie je pozorování útlumu vysílaných ultrazvukových vln. Různé struktury a jejich vlastnosti mají vliv na některé fyzikální vlastnosti ultrazvuku při průchodu materiálem. Struktura je posuzována z velikosti tohoto útlumu.

##### 3.1.1 Velikost útlumu

Při průchodu ultrazvukové vlny prostředím klesá hodnota akustického tlaku. Pokles je závislý na vlastnostech daného prostředí, kterým vlna prochází. U kovových materiálů je tento pokles dán důsledkem absorpce a rozptylu ultrazvuku. Hodnotu útlumu vyjadřujeme tzv. činitelem útlumu:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \quad [dB \text{ mm}^{-1}] \quad (1)$$

$\alpha_a$  . . . absorpční součinitel

$\alpha_s$  . . . rozptylový součinitel [1]

### 3.1.2 Absorpce

Absorpce převládá u nižších frekvencí a vzniká v důsledku vnitřního tření kmitajících částic, hysterezních ztrát, plastického tečení, relaxačních a tepelných jevů. Mechanická energie kmitajících částic se přeměňuje v tepelnou. Se vzrůstající frekvencí se ztráty absorpcí zvyšují podle následujícího vztahu. [1]

$$\alpha_a = a \cdot f \quad (\text{někdy se užívá též: } \alpha_a = a \cdot f^2) \quad (2)$$

### 3.1.3 Rozptyl

Rozptyl ultrazvukové energie převládá u vyšších frekvencí a je dán nehomogenitou materiálu. Útlum rozptylem je charakteristický zejména pro polykrystalické struktury, na jejichž rozhraní se mění skokem akustický odpor. Kovy obsahují velké množství různě orientovaných zrn, a tak má rozptyl vysoký vliv na velikost činitele útlumu. Jemnozrnná struktura materiálu šíření zvuku příliš neovlivňuje, protože vlnová délka je oproti průměru zrna poměrně větší. Pokud odpovídá průměrná velikost zrna vlnové délce, dochází k odchýlení části zvuku ze směru šíření. Útlum ultrazvuku je tedy závislý na velikosti zrna a na vlnové délce (frekvence a druh ultrazvukové vlny). [1]

Podle vzájemného poměru střední velikosti zrna  $\bar{D}$  a délky ultrazvukové vlny  $\lambda$  rozlišujeme:

- **Rayleighův rozptyl ( $\lambda \gg \bar{D}$ ):**

$$\alpha_{s1} = K_1 \cdot \mu^2 \cdot \bar{V} \cdot f^4 = a_{21} \cdot f^4 \quad (3)$$

- **Stochastický rozptyl ( $\lambda \approx \bar{D}$ ):**

$$\alpha_{s2} = K_2 \cdot \mu^2 \cdot \bar{D} \cdot f^2 = a_{22} \cdot f^2 \quad (4)$$

- **Difuzní rozptyl (  $\lambda < \bar{D}$  ):**

$$\alpha_{s3} = K_3 \cdot \mu \cdot \bar{D}^{-1} = a_{23} \quad (5)$$

- **Heterogenní rozptyl (  $\lambda << \bar{D}$  ):**

$$\alpha_{s4} = K_4 \cdot \mu \cdot \bar{D}^{-1} \cdot f^2 + \frac{\bar{R}_b}{\bar{D}} = a_{24} \cdot f^2 + \frac{\bar{R}_b}{\bar{D}} \quad (6)$$

$\alpha_{s1}$  ,  $\alpha_{s2}$  ,  $\alpha_{s3}$  ,  $\alpha_{s4}$  ... součinitele rozptylu

$K_1$  ,  $K_2$  ,  $K_3$  ,  $K_4$  ... konstanty rozptylu

$\mu$  ... pružná anizotropie

$a_{21}$  ,  $a_{22}$  ,  $a_{23}$  ,  $a_{24}$  ... ztrátová čísla vyjadřující ztráty u jednotlivých typů rozptylu

$\bar{D}$  ... střední velikost zrna

$\bar{V}$  ... střední objem zrna

$\bar{R}_b$  ... střední činitel odrazu na hranicích zrn

$f$  ... frekvence ultrazvuku [1]

### 3.1.4 Měření velikosti útlumu

Měření se provádí na základě srovnání velikostí koncových ech zobrazovaných na obrazovce přístroje. Činitel útlumu je možno vypočítat podle vztahu:

$$\alpha = \frac{1}{2d} \left( 20 \log \frac{H_n}{H_{n+1}} + 20 \log \frac{\phi_{n+1}}{\phi_n} - 20 \log \frac{n+1}{n} + 20 \log R \right) \quad [dB \cdot mm^{-1}] \quad (7)$$

$20 \log \frac{H_n}{H_{n+1}}$  ... poměr skutečných koncových ech změřený atenuátorem  
defektoskopu

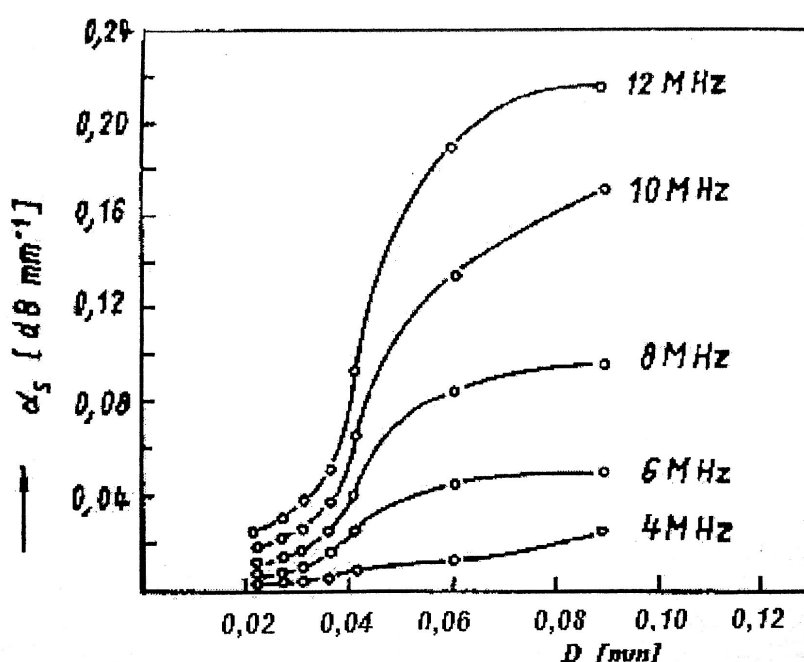


$20 \log \frac{\phi_{n+1}}{\phi_n}$	... opravný činitel vyjadřující odchylku od lineárního poklesu velikosti koncového echa se vzdáleností
$20 \log \frac{n+1}{n}$	... ztráty velikosti echa následkem geometrie ultrazvukového pole mezi skutečnými echy
$20 \log R$	... součinitel reflexe ve vazební vrstvě
$d$	... tloušťka vzorku

[1]

### 3.1.5 Stanovení velikosti zrna struktury

Součinitel rozptylu je v oblasti Rayleighova rozptylu úměrný objemům střední velikosti zrn. Složka útlumu absorpcí  $\alpha_a$  nemá podstatný vliv na celkový činitel útlumu  $\alpha$ . Přesnějším způsobem měření velikosti zrna je tedy stanovit součinitel rozptylu  $\alpha_s$ . Máme-li dva vzorky o stejné tloušťce a stejné jakosti povrchu a známe-li u jednoho metalograficky zjištěnou velikost zrna, je možno měřením útlumu v obou vzorcích při stejné akustické vazbě výpočtem zjistit u druhého vzorku přibližnou velikost zrna [1].



Obr. 3.1: Závislost součinitele rozptylu na střední velikosti zrna a frekvenci u feriticko-perlitické struktury oceli železničních náprav [1]

Při měření se zaměřujeme na frekvenci, kdy se uplatňují pouze ztráty absorpcí, které poté odečteme od celkového činitele útlumu. Získáme tak ztráty způsobené pouze rozptylem na zrnech struktury. Přibližný výpočet hledané velikosti zrna určíme z poměru:

$$\frac{a_2}{\alpha_{2x}} = \frac{\bar{D}^3}{\bar{D}_x^3} \quad (8)$$

$a_2$  ... ztrátové číslo rozptylu vzorku se známou velikostí zrna  $\bar{D}$

$\alpha_{2x}$  ... ztrátové číslo rozptylu vzorku s hledanou velikostí zrna  $\bar{D}_x$  [1]

### 3.1.6 Další strukturní parametry závislé na útlumu ultrazvuku

- **Množství feritické složky v oceli:**

S rostoucím obsahem feritické složky narůstá útlum ultrazvukových vln.

- **Widmannstättenova struktura:**

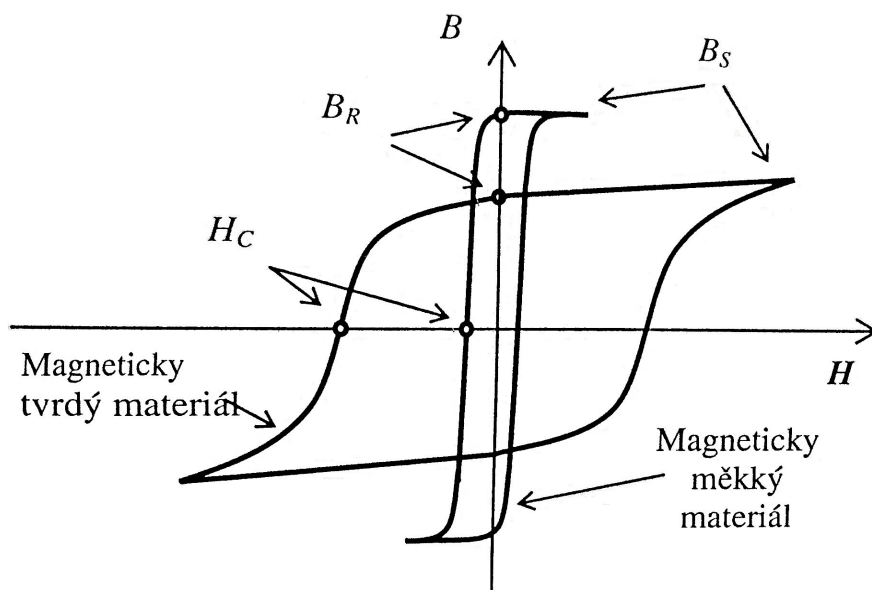
Widmannstättenova struktura má mnohem výraznější útlum především v oblasti vyšších frekvencí ve srovnání s polyedrickou strukturou.

- **Řádkovitá struktura:**

Řádky struktury, složené pouze z feritických zrn při průchodu ultrazvukových vln, souhlasí-li směr jejich pronikání se směrem řádků, způsobují nekontrolovatelné zvýšení útlumu. [1]

## 3.2 Magnetické a elektromagnetické strukturoskopické metody

Základem těchto metod je využití souvislosti mezi magnetickými vlastnostmi materiálu a jeho strukturně mechanickým stavem. Tento stav se určuje měřením určitého magnetického parametru hysterezní smyčky (obr. 3.2), který souvisí se sledovanou vlastností kontrolovaného objektu.



Obr. 3.2: Hysterezní křivky materiálu magneticky tvrdého a měkkého [1]

Charakteristické parametry hysterezní křivky:

$B_S$  – indukce nasycení

$B_R$  – remanence

$H_C$  – koercitivita

$P_h$  – měrné ztráty

Experimentálně bylo prokázáno, že hysterezní křivka a její charakteristické parametry (viz. výše) citlivě reagují na některé mechanické vlastnosti, zejména tvrdost nebo pevnost materiálu. Tvar hysterezní křivky je také dobrým ukazatelem strukturního stavu tepelně zpracovaného výrobku. Širší křivky jsou charakteristické pro kalené součásti a užší křivky pro součásti popouštěné. [1]

Oblast využití magnetických strukturoskopických metod je zaměřena především na kontrolu:

- tepelného zpracování
- chemického složení
- mechanického pnutí
- hloubky povrchových vrstev (oduhličení, prokalení, nitridace apod.)

Způsoby měření hysterezní smyčky a jejích parametrů:

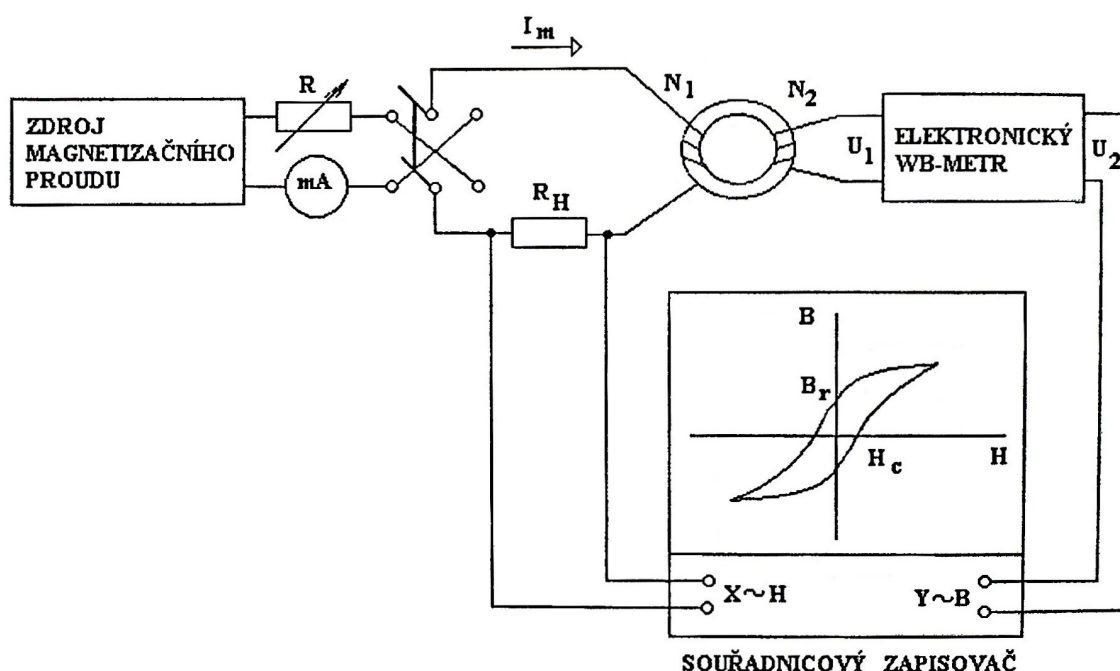
- **Magnetické strukturoskopické metody** – pro měření je využíváno stejnosměrné nebo pomalu se měnící excitační magnetické pole.
- **Elektromagnetické metody** – využívají Faradayův princip elektromagnetické indukce. Magnetizační proud je střídavý a magnetické pole je časově proměnné. V základu jsou shodné s metodou vířivých proudů, od které se odlišují svým kmitočtem v rozsahu jednotek až stovek Hz (max. 1 kHz). [1]

### 3.2.1 Měření hysterezních křivek feromagnetických materiálů

Hysterezní křivka vyjadřuje závislost magnetické indukce  $B$  na intenzitě magnetického pole  $H$ . Pro posouzení žádaného vztahu mezi magnetickými vlastnostmi a kontrolovaným stavem výrobku je někdy nutné změřit magnetizační křivky na připravených vzorcích s definovanými fyzikálními vlastnostmi. Záznam hysterezní křivky zprostředkovává měřicí technika plynulým zmagnetizováním vzorku v jednom nebo více magnetovacích cyklech. K určení magnetické indukce  $B$  se často používá integrační metoda založená na integraci napětí indukovaného v měřicí cívce, umístěné na vzorku. Intenzitu magnetického pole  $H$  odvozujeme buď z magnetovacího proudu, nebo měříme její tangenciální složku u povrchu vzorku tangenciální Hallovo sondou. [1]

### 3.2.1.1 Měření na uzavřených vzorcích

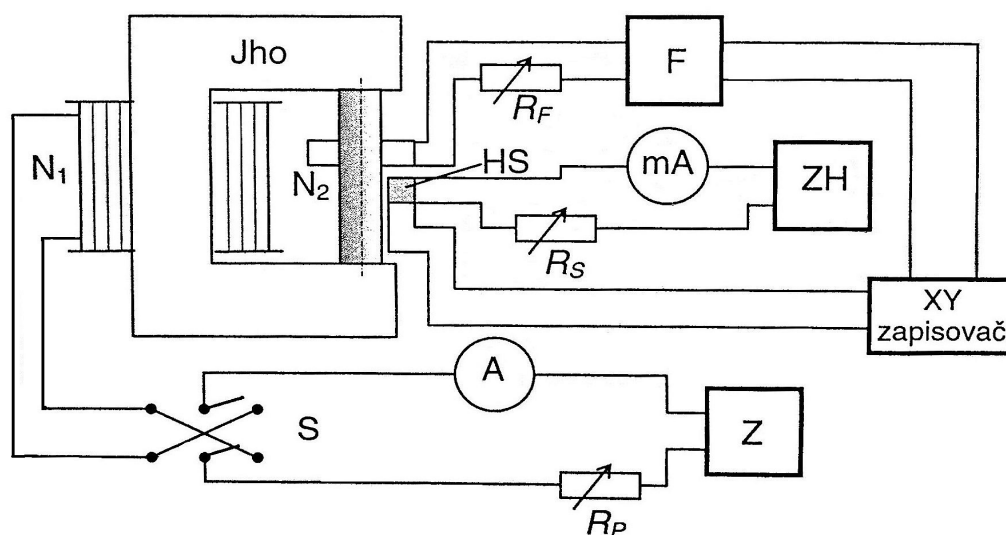
Měření magnetizačních charakteristik feromagnetik na uzavřených vzorcích popisuje obr. 3.3. Vzorek je opatřen magnetizačním vinutím  $N_1$  a měřicím vinutím  $N_2$ . Pomalé změny proudu ve vinutí  $N_1$  způsobují indukci napětí v měřicím vinutí  $N_2$ . K určení magnetické indukce  $B$  ve vzorku musíme napětí  $u_1(t)$  integrovat přes integrační zesilovač obsažený v elektronickém Wb-metru (fluxmetru). Výstupní napětí  $u_2$  z Wb-metru je úměrné magnetické indukci  $B$  ve vzorku. Intenzita magnetického pole  $H$  je úměrná magnetizačnímu proudu. Při plynulém přemagnetování vzorku získáme grafický záznam průběhu magnetizačních charakteristik, který zprostředkovává souřadnicový X-Y zapisovač. [1]



Obr. 3.3: Měření magnetizačních charakteristik feromagnetik na uzavřených vzorcích [1]

### 3.2.1.2 Měření na otevřených vzorcích

Častěji se setkáváme se vzorky otevřených tvarů, např. tyček kruhového či čtvercového průřezu. U těchto vzorků se problematičtěji určuje intenzita magnetického pole  $H$ , neboť se při jejich magnetování vytváří ve vnějším okolí vzorku demagnetizační magnetické pole. Tento problém je vyřešen použitím jha z magneticky měkkého materiálu. V magnetovacím vinutí  $N_1$  napájeným proudem ze zdroje  $Z$  se budí magnetické pole. Intenzita magnetického pole  $H$  se určuje měřením její tangenciální složky těsně nad povrchem vzorku pomocí tangenciální Hallovy sondy  $HS$ , napájené zdrojem  $ZH$ . Výstupní napětí z Hallovy sondy je přivedeno na osu  $X$  souřadnicového zapisovače. Magnetická indukce  $B$  se měří integrací napětí z měřicí cívky s  $N_2$  závitů pomocí fluxmetru  $F$ . [1]



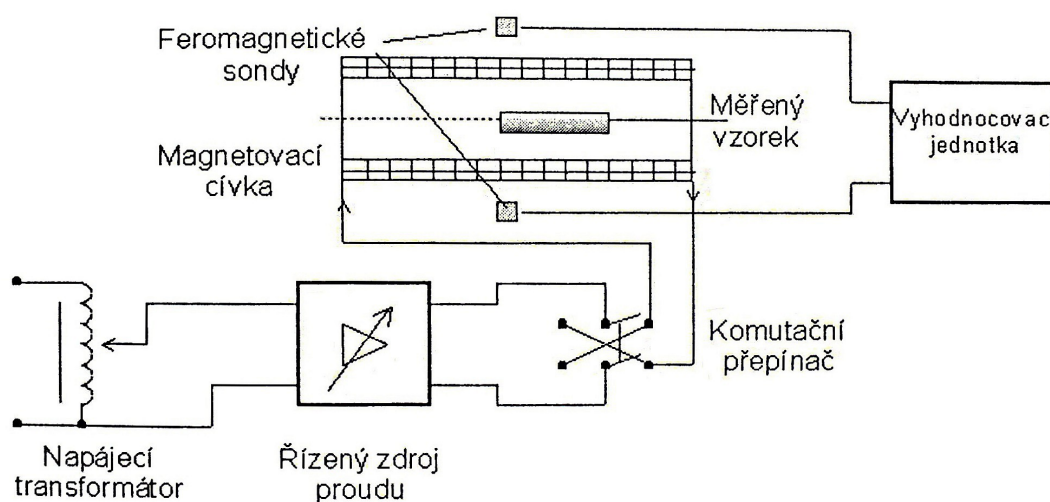
Obr. 3.4: Měření magnetizačních charakteristik na otevřených vzorcích [1]

### 3.2.1.3 Digitalizace měření magnetizačních charakteristik

Moderní přístroje pro měření magnetizačních charakteristik nazýváme hysterezigrafy. Měření řídí počítač a proces je plně digitalizován, což zaručuje podstatně větší přesnost oproti přístrojům analogovým. Kromě magnetické indukce  $B$  a intenzity magnetického pole  $H$  jsou schopny tyto přístroje propočítávat také hysterezní ztráty  $P_h$ , koercitivitu  $H_c$ , remanentní indukci  $B_r$  a zobrazovat hysterezní smyčku. [1]

### 3.2.2 Měření koercitivity

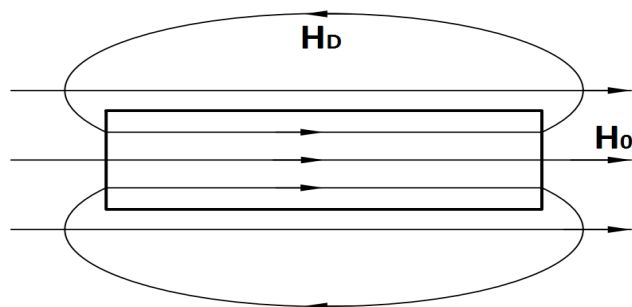
Měření koercitivity lze provádět pomocí tzv. koercimetrů, a to bez nutnosti měření celé hysterezní křivky. Blokové schéma koercimetru je na obr. 3.5. Vzorek je magnetizován v magnetizační cívce až do jeho nasycení v jednom směru intenzity magnetického pole (proud je zvyšován do maxima a snižován zpět na nulu). Následně je magnetizační proud komutován a plynulým zvyšováním intenzity magnetického pole v opačném směru se hledá stav, kdy magnetizace vzorku bude nulová. Stav nulové magnetizace indikují feromagnetické sondy nulovým výstupním signálem. Koercitivita vzorku odpovídá hodnotě intenzity magnetického pole cívky. [1]



Obr. 3.5: Blokové schéma koercimetru [1]

### 3.2.3 Vliv tvaru součásti na pokles informace

Tvar součásti má významný vliv na získávanou informaci při měření výrobků. Může se projevit rušivým vlivem a snižovat obsah informace, nebo způsobit její úplný zánik. Na rozdíl od uzavřených (toroidních) vzorků, dochází při magnetování vzorků s volnými konci stejnosměrným magnetickým polem k demagnetizačnímu efektu (obr. 3.6). Součást si při magnetování vytvoří vlastní magnetické pole, které vně součásti zeslabuje původní magnetické pole. U vzorků s otevřeným koncem je proto nutné při výpočtech magnetických veličin započítávat také tvarový vliv prostřednictvím efektivní permeability tvaru  $\mu_{\text{ef}}$ . [1]



Obr. 3.6: Demagnetizační efekt u válcové součásti

### 3.2.4 Principy magnetických strukturoskopických metod

V praxi je zapotřebí výrobky prověřovat co možná nejrychlejším způsobem kontroly. Laboratorní měřicí metody s upínáním do magnetizačního jha, nebo s opatřením vzorku měřicím a magnetizačním vinutím tedy nejsou příliš vhodné. Provedení a uspořádání měřicích přístrojů je závislé na magnetické veličině, kterou je sledován strukturně mechanický stav součásti.

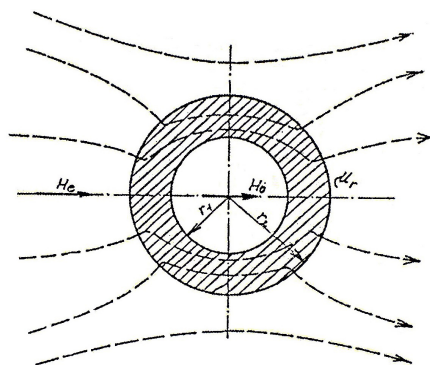
#### 3.2.4.1 Principy se stejnosměrným nebo kvazistatickým magnetickým polem

Budící magnetické pole je u těchto zkoušek časově neměnné nebo se mění jen velmi nízkou frekvencí (desetiny Hz). Vířivé proudy se v materiálu neindukují nebo jsou zanedbatelné. Kontrolou zjišťujeme změny určitého magnetického parametru a princip kontroly je volen především v závislosti na tvaru výrobku. [1]

- **Metoda magnetického stínění**

Metoda je využívána pro výrobky s dutinou. Při magnetizaci příčným stejnosměrným polem dochází k vychýlení části magnetických indukčních čar z dutiny do magneticky vodivějších stěn (viz. Obr. 3.7). V dutině magnetické pole poklesne. [1]

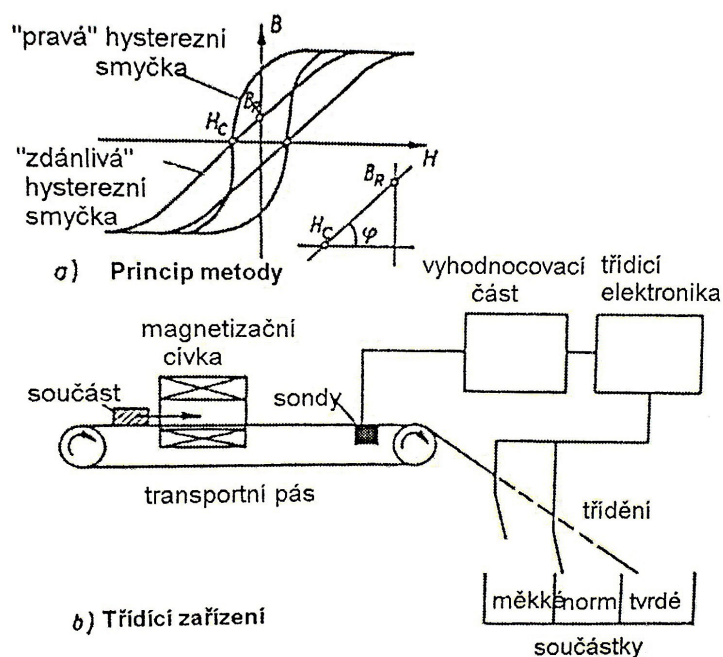




Obr. 3.7: Metoda magnetického stínění [1]

- **Kontrola metodou zbytkového magnetického pole**

Součást je zmagnetizována stejnosměrným magnetickým polem, a poté je v její blízkosti měřena velikost remanentního magnetického pole (viz. Obr. 3.8)

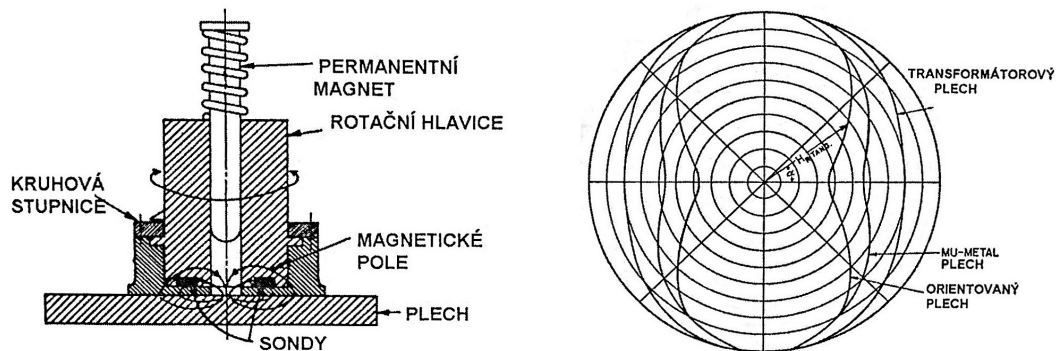


Obr. 3.8: Metoda zbytkového magnetického pole [1]

- **Metoda bodového pólu (magnetické skvrny)**

Používá se především pro rozměrnější výrobky (plechy, odlitky atd.). Metodu lze využít k měření magnetické orientace plechů pro elektrotechniku (viz. Obr. 3.9). Skrze měřicí hlavici je na plech přitlačen permanentní magnet (starší způsob),

který vytvoří na povrchu plechu bodový pól. Po oddálení magnetu se měří složka zbytkového pole feromagnetickými sondami. Podrobněji je metoda popsána v kapitole 4.2.



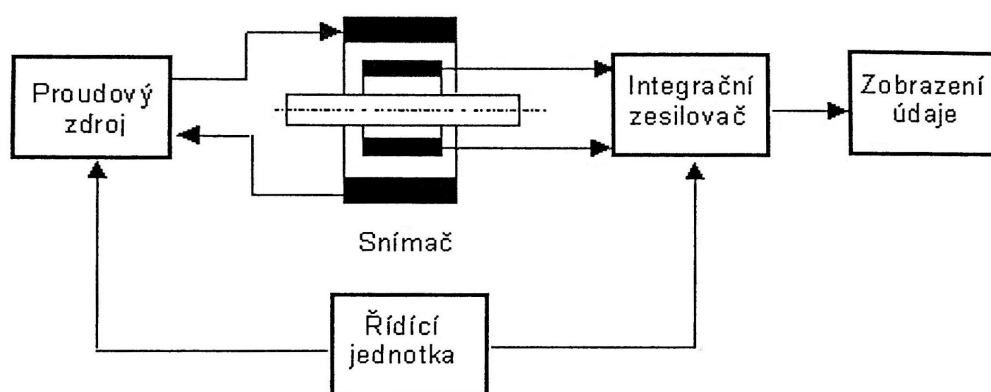
Obr. 3.9: Metoda bodového pólu [1]

- **Měření magnetické indukce**

Pro měření se používá strukturoметр na principu měření magnetické indukce (viz. Obr. 3.10). Při přemagnetování součásti se v měřicím vinutí indukuje napětí

$$u = \text{konst.} \cdot \frac{dB}{dt}, \text{ které je integrováno v integračním zesilovači pro obdržení údaje}$$

úměrného magnetické indukci  $B$ . [1]

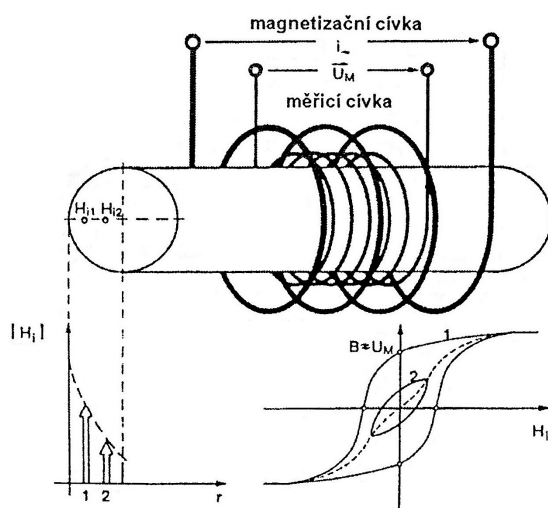


Obr. 3.10: Strukturoметр na principu měření magnetické indukce [1]

### 3.2.4.2 Principy se střídavým magnetickým polem

Pro magnetování součásti je použito střídavých proudů s kmitočty desítek Hz až jednotek kHz. V důsledku použití střídavých proudů je v měřicím signálu ze snímače obsažena nejen informace daná magnetickými vlastnostmi, ale také indukovanými proudy v materiálu, jejichž velikost závisí hlavně na elektrické vodivosti. Princip zkoušení je uveden na obr. 3.11.

Vlivem výrazné nelinearity hysterezní křivky dochází při zvýšení intenzity budícího pole v oblasti nasycení ke zkreslení indukovaného napětí. Napětí tak obsahuje nejen základní harmonické, ale také vyšší harmonické složky. Velikost těchto složek ve změřeném signálu lze ovlivňovat změnou intenzity budícího proudu. Vyšší harmonické složky signálu jsou velmi důležitým parametrem při měření, neboť až v jejich zastoupení se často projevují zkoušené vlastnosti materiálu. Typickým příkladem pro rozlišení vyššími harmonickými složkami jsou změny struktury.



Obr. 3.11: Princip strukturoskopických metod se střídavým magnetickým polem

[1]

### Způsoby použití metod se střídavým magnetickým polem:

Zkušební frekvence je dalším důležitým parametrem při měření, neboť velmi výrazně ovlivňuje hloubku vniku a rozložení magnetického pole v materiálu. V závislosti na frekvenci existuje několik způsobů měření se střídavým magnetickým polem:

- **Jednofrekvenční zkoušení** – pro měření je určena optimální zkušební frekvence a nastavuje se optimální budící proud. Měření tímto způsobem je velmi rychlé a jednoduché, ale při náročnějších zkušebních úlohách poskytuje menší spolehlivost.
- **Víceparametrické zkoušení** – je součástí přístrojů novější generace. Při měření je použita kombinace různých zkušebních frekvencí a budících proudů s cílem dosažení co nejvyšší spolehlivosti kontroly. Pro jednotlivé vlastnosti zkoušeného materiálu platí, že se projevují různě silně při různých nastaveních zkušební frekvence a budícího proudu. Můžeme tedy použít několik různých nastavení parametrů přístroje, při kterých se jednotlivé vlastnosti zkoušeného materiálu projevují nejsilněji a celé měření tak optimalizovat pro určitý materiál. [1]

### 3.2.5 Vyhodnocování naměřených hodnot

Nejčastěji se vyhodnocení naměřených hodnot provádí tzv. skupinovou analýzou. Na základě kalibrace pomocí již známých vzorků vznikne jedna nebo více ohraničených množin, které představují jednotlivé skupiny materiálů. Tento způsob je velmi jednoduchý a při víceparametrickém zkoušení podává spolehlivost i v případě zkoušení vzájemně podobných materiálů.

Dalším způsobem vyhodnocování je regresní analýza. Kromě porovnání různých materiálů lze také současně změřit určitou vlastnost v příslušných jednotkách (tvrdost, pevnost, hloubku prokalení apod.). Kalibrací vzorků o známé vlastnosti (tvrdost, pevnost apod.) se uloží do paměti přístroje regresní přímka, umožňující u neznámých vzorků měření konkrétních hodnot jejich tvrdosti, pevnosti atd. Vícenásobná regresní analýza dovolu je měření dokonce i více vlastností materiálu najednou. [1]

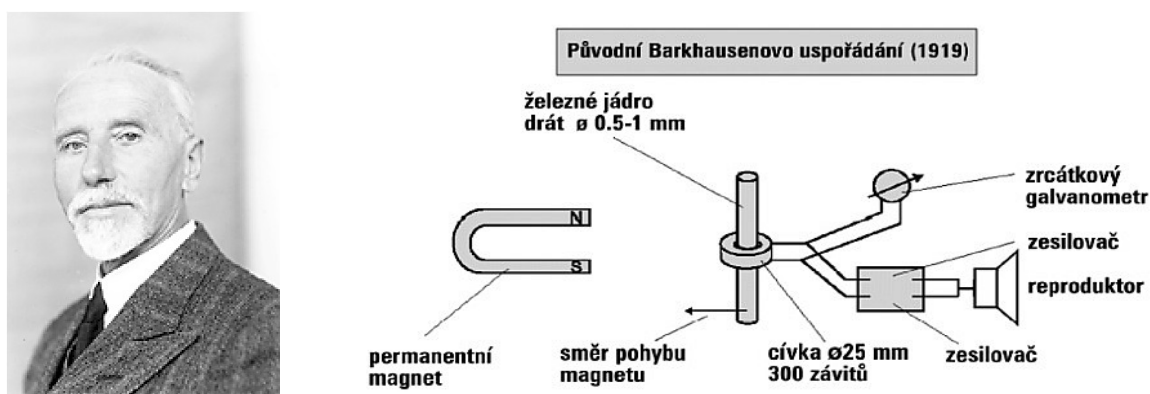
## 4. Analýza Barkhausenova šumu a metoda magnetické skvrny

Každá z těchto dvou magnetických metod pracuje na jiném principu. Liší se měřeným parametrem a hloubkou měření. Obě metody však spojuje schopnost citlivě reagovat na strukturní stav materiálu. Díky provedení měřicích přístrojů, rychlosti měření a možnosti změny snímačů podle tvaru součástí jsou metody ideální pro nasazení přímo v provozních podmínkách.

### 4.1 Metoda analýzy Barkhausenova šumu

Barkhausenův šum je fyzikální jev popsáný Heinrichem Georgem Barkhausenem v roce 1919. Pomocí svého aparátu (obr. 4.1) Barkhausen zjistil, že přiblížením či vzdálením magnetu od ocelového jádra, je v reproduktoru slyšitelné chrastění či praskání. Později bylo zjištěno, že tento efekt souvisí s tvrdostí ocelového jádra. U materiálů s větší tvrdostí je intenzita praskání menší. Dále bylo zjištěno, že tahová napětí ve směru magnetizace stimulují výrazné chrastění, zatímco tlaková napětí působí opačně.

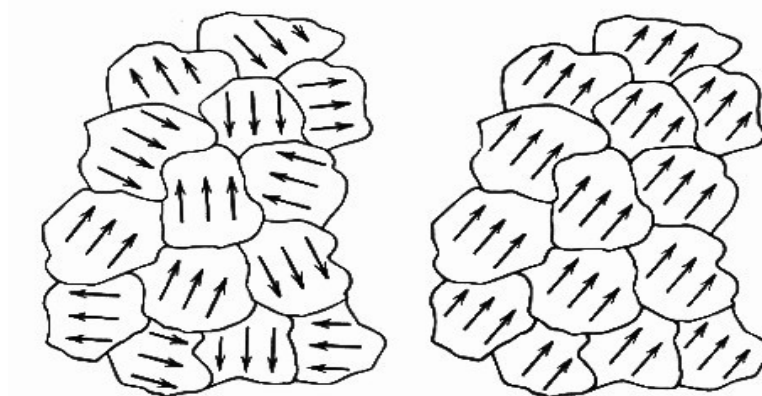
Tento pozoruhodný fyzikální jev se stal díky rozvoji elektroniky průmyslovou metodou pro detekci strukturních a napěťových změn v materiálu. Metoda je úspěšně využívána pro hodnocení integrity povrchu po obrábění či tepelném zpracování. [10]



Obr. 4.1: Heinrich Georg Barkhausen a jeho aparát v původním uspořádání [10]

### 4.1.1 Fenomenologický popis jevu

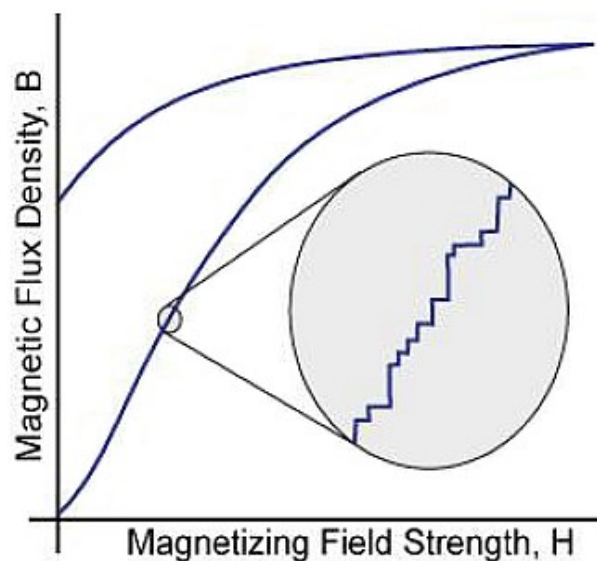
Feromagnetické materiály si můžeme představit jako systém malých magnetických oblastí podobných tyčovým magnetům, které se nazývají magnetické domény (Weissovy domény). Každá z domén se magnetizuje podél krystalograficky význačných směrů. Domény jsou přitom odděleny hranicemi, kterým říkáme doménové stěny (Blochovy stěny). Vlivem vnějšího magnetického pole dochází k pohybu doménových stěn. Aby se doménová stěna mohla pohnout, doména na jedné straně stěny se musí zvětšit a doména na druhé straně se musí smrštit. Výsledkem je změna v celkové magnetizaci vzorku (obr. 4.2).



*Obr. 4.2: Uspořádání domén ve feromagnetické látce*

*vlevo – normální stav, vpravo – po vložení do magnetického pole [11]*

Umístíme-li cívku do blízkosti vzorku v době, kdy se doménová stěna pohybuje, související změna magnetizace vzorku indukuje v cívce elektrický puls. Sledováním pohybu doménových stěn Barkhausen dokázal, že magnetizační proces není spojitý, ale je tvořen malými skoky, vzniklými pohybem magnetických domén v důsledku vnějšího magnetického pole (obr. 4.3). Pokud spojíme pulsy vznikající pohybem domén, vzniká typický signál nazývaný jako Barkhausenův šum [10].



Obr. 4.3: Náhlé skoky hysterezní smyčky vzniklé při magnetizaci [12]

#### 4.1.2 Útlum Barkhausenova šumu

Barkhausenův šum má pro většinu materiálů frekvenční spektrum začínající na magnetizačním kmitočtu a končící přibližně na 250 kHz. Signál je exponenciálně tlumen v závislosti na vzdálenosti, kterou projde uvnitř materiálu. Primární příčinou tlumení jsou vířivé proudy indukované při šíření signálu vznikajícího pohybem domén. Útlum určuje hloubku, ze které lze ještě informaci získat (měřicí hloubku). Pro běžné aplikace se hloubka měření pohybuje mezi 0,01 a 1,5 mm [10].

**Mezi hlavní faktory ovlivňující tuto hloubku patří zejména:**

- frekvenční rozsah generovaného signálu
- vodivost a permeabilita zkoušeného materiálu

Při měřeních používáme jednotku odpovídající amplitudě Barkhausenova šumu, tzv. magnetoelastický parametr (MP).

### 4.1.3 Parametry ovlivňující signál Barkhausenova šumu

#### 4.1.3.1 Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou taková napětí, která v materiálu zůstávají i po odstranění příčiny jejich vzniku. Příčinou vzniku jsou tepelná a mechanická zatížení povrchu při technologických operacích, zejména dokončovacích, jako je broušení či tepelné zpracování. Tato napětí výrazně ovlivňují zejména únavovou pevnost, korozivzdornost a otěruvzdornost. Mají tedy význam pro celkovou životnost součástí.

Podle velikosti objemů, ve kterých se zbytková napětí nemění z hlediska velikosti a směru působení, rozdělujeme na:

##### ***Zbytková napětí I. druhu (makroskopická):***

- Tato napětí považujeme přibližně za homogenní v makroskopickém objemu materiálu (ve větším počtu zrn). Mohou vznikat v důsledku technologických operací (tepelné zpracování, obrábění, tváření, odlévání, svařování apod.) nebo vlivem zatížení různého charakteru (provozní, montážní).

##### ***Zbytková napětí II. druhu (mikroskopická):***

- Považujeme za přibližně homogenní v oblastech velikosti zhruba jednotlivého zrna. Vznikají při tepelných procesech v materiálu, jehož fáze mají rozdílné hodnoty teplotních součinitelů délkové roztažnosti. Další příčinou mohou být deformace materiálu skládajícího se buď z jedné fáze (jejíž zrna jsou však různě orientovány k silovému toku a jejichž mez kluzu je anizotropní) nebo z více fází s různými mechanickými vlastnostmi.

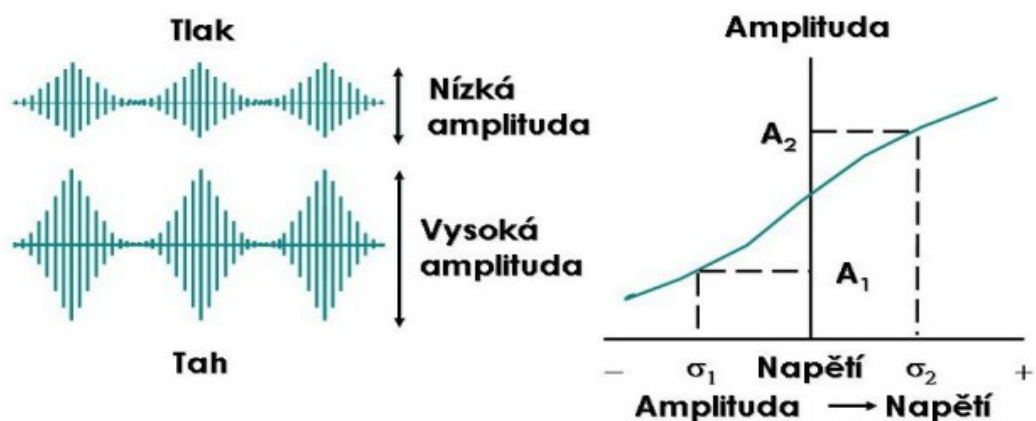
##### ***Zbytková napětí III. druhu (submikroskopická):***

- Jsou nehomogenní i v oblastech srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi. Vznikají v důsledku vzniku strukturních poruch v materiálu. [13]

U reálných součástí se vyskytují všechny druhy zbytkových napětí současně.



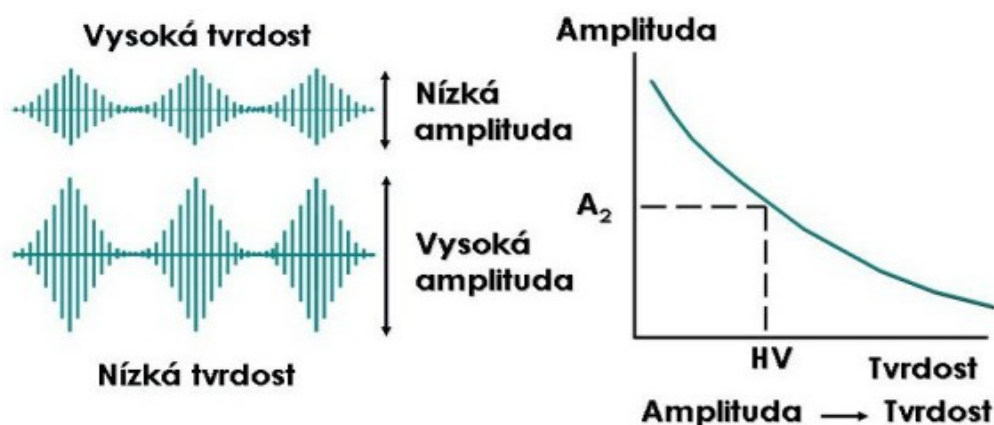




Obr. 4.5: Vliv napětí na snímaný signál Barkhausenova magnetického šumu [14]

#### 4.1.3.2 Metalurgická struktura

Významně se na ovlivnění intenzity Barkhausenova šumu podílí také metalurgická struktura. Tento úkaz lze hrubě popsat pomocí tvrdosti. S rostoucí tvrdostí materiálu dochází k poklesu intenzity Barkhausenova šumu (obr. 4.6). Příčinou je, že pohyb doménových stěn je blokován v zásadě stejnými překážkami a defekty, jako pohyb dislokací při plastické deformaci. Z tohoto důvodu poskytuje měření Barkhausenova šumu informaci o mikrostrukturním stavu materiálu. [10]



Obr. 4.6: Vliv tvrdosti na snímaný signál Barkhausenova magnetického šumu [14]

### **Tvrдость materiálu je dána především:**

- Jemností krystalizace – jemnozrnná struktura má v objemu více krystalografických rozhraní, které způsobují nárůst tvrdosti
- Tvarem krystalických elementů
- Cizí příměsí – všechny příměsi snižují plasticitu kovu, a tím zvětšují jeho tvrdost
- Vnitřním pnutím – pnutí různého charakteru zvětšuje tvrdost, např. pnutí způsobená ochlazováním, nestabilními fázemi, tvářením za studena apod.
- Teplotou – s narůstající teplotou se vlivem roztažnosti stávají vazby málo pevné a materiál je měkčí [15]

### **Nedestruktivní kontrolou tvrdosti prověřujeme zejména tyto strukturní parametry:**

- tepelné zpracování
- hloubky povrchových vrstev (oduhličení, prokalení, nitridace apod.)
- chemické složení

### **Tvrдость strukturních složek a fází oceli**

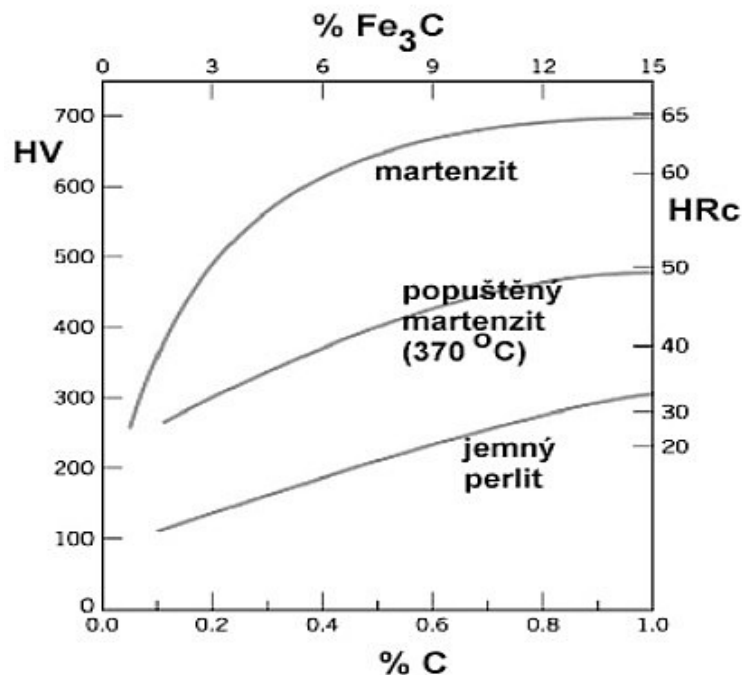
Tvrдость je ukazatelem druhu struktury oceli, neboť její každá strukturní složka či fáze má jiné hodnoty tvrdosti. Bližší hodnoty tvrdostí jednotlivých strukturních složek a fází oceli udává tabulka 4.1. Při tepelném zpracování dochází pomocí řízených tepelných cyklů k fázovým a strukturním přeměnám a mění se tedy i tvrdost materiálu. Oceli podrobené nerovnovážnému tepelnému zpracování obsahují martenzitickou (popř. bainitickou) strukturu, u které je tvrdost dána intersticiálním zpevněním atomy uhlíku a vysokou hustotou mřížkových poruch. U ocelí s rovnovážnými strukturami (feriticko-perlitická nebo perliticko-cementitická) budou hodnoty tvrdosti daleko nižší. Hodnoty tvrdosti vybraných karbidů jsou uvedeny v tabulce 4.2. Vliv obsahu uhlíku a cementitu na tvrdost složek v oceli je uveden v obr. 4.7.

*Tabulka 4.1: Tvrdost strukturních složek a fází oceli [16]*

<b>Fáze a strukturní složky</b>	<b>Tvrdost dle Vickerse</b>
Fe	85
Ferit	85 - 130
Austenit	120 - 180
Austenit zpevněný	až 800
Perlit hrubý	200 - 250
Perlit jemný	250 - 300
Bainit horní	300 - 400
Bainit dolní	400 - 550
Martenzit nízkouhlíkový	600 - 700
Martenzit vysokouhlíkový	700 - 850

*Tabulka 4.2: Tvrdosti karbidů [16]*

<b>Typ karbidu</b>	<b>Prvek</b>	<b>Tvrdost dle Vickerse ( HV0,3 )</b>
$M_3C$	Fe, Mn	950 - 1300
$M_{23}C_6$	Cr	1000 - 1100
$M_7C_3$	Cr	1600 - 1800
$M_6C$	W, V	1200 - 1300
MC	V	2100 - 2800
$M_2C$	Mo	1700 - 1900



Obr. 4.7: Závislost tvrdosti vybraných strukturních složek na obsahu uhlíku a cementitu [17]

#### 4.1.4 Praktické využití magnetoelastické metody Barkhausenova šumu

Mnoho běžných vad povrchu, jako spálení po broušení, nezakalená místa, oduhličené plochy atd., způsobují změny v napětí či mikrostruktuře a mohou být indikovány magnetoelastickými metodami. Stejně tak různé dynamické procesy jako tečení nebo únava materiálu způsobují změny v napětí a mikrostruktuře a mohou být sledovány magnetoelasticky. Odezva Barkhausenova šumu je okamžitá a je tedy vhodná k nasazení do provozní kontroly jak výroby sériové, tak jednotlivých dílů. Díky tomu, že úroveň Barkhausenova šumu je mírou poškození povrchu součásti, je metoda hojně využívána pro optimalizaci procesu broušení. Úspěšně se metoda uplatňuje pro kontrolu procesů obrábění, tepelného zpracování nebo k nedestruktivnímu stanovení tvrdosti či zbytkového napětí feromagnetických materiálů. [10, 18, 19]

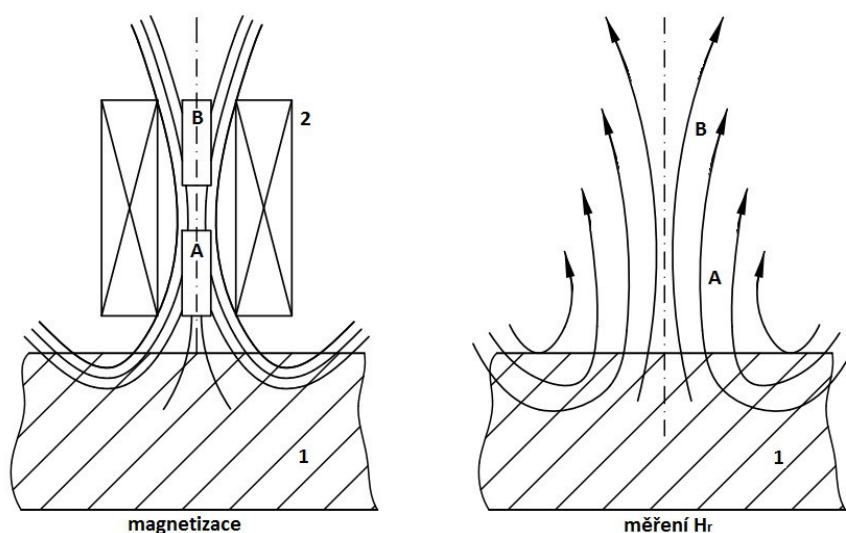
## 4.2 Metoda magnetické skvrny

Název metody je odvozen od magnetické skvrny vznikající v důsledku místního, obvykle impulsního zmagnetizování materiálu. Remanentní magnetická indukce zmagnetovaného materiálu na povrchu vytváří remanentní (zbytkové) magnetické pole. Intenzita tohoto pole má souvislost se strukturou v magnetické skvrně.

Tato metoda, někdy též nazývaná metoda magnetického bodového pólu, má významné postavení v oblasti lokální magnetické strukturoskopie. Aplikační rozšíření našla ve formě impulsní magnetické kontroly ocelových plechů a litinových odlitků. V Evropě se pro tuto skupinu materiálů využívá výhradně magnetoinduktivní střídavé metody. Pro výrobky ve formě tvářených polotovarů a odlitků s neupravenými povrchy se lépe hodí „kvazistatická“ lokální metoda magnetické skvrny [9].

### 4.2.1 Princip metody magnetické skvrny

Na zkoušené místo výrobku působí impulsní magnetické pole o intenzitě  $H_0$ . Po zániku tohoto magnetického pole vzniká tzv. remanentní polarizace  $I_r$  a zmagnetované místo obsahuje vlastní zbytkové magnetické pole o intenzitě  $H_r$ . Hodnota intenzity  $H_r$  se měří pomocí Hallovy nebo Försterovy sondy.



Obr. 5.1: Generování magnetické skvrny pomocí magnetizační cívky [9]

1 – materiál; 2 – magnetická cívka; A,B – snímače  $H_r$

Obvykle měříme složku remanentní intenzity  $H_m$  kolmo k měřenému povrchu nebo gradient normálové složky  $\nabla H_m$ . Měřicí přístroj se nastavuje podle magneticky tvrdého etalonu nebo normálu intenzity pole  $H$ . Lineární kvantifikace strukturní složky (např. Perlitu) nebo tvrdosti HB získaná regresní analýzou bývá vyhovující [9].

## 5. Experimentální část

Pro zjišťování strukturních parametrů pomocí metody Barkhausenova šumu byly zvoleny vzorky z chrom-křemíkové oceli ČSN 14 260. K zajištění různorodosti struktury se jednotlivé vzorky tepelně zpracovávaly do různých stavů uvedených v tabulce 6.1.

*Tabulka 6.1: Přehled vzorků*

<b>VZOREK</b>	<b>STAV</b>
<b>1</b>	<i>základní stav (žíháno na měkko)</i>
<b>2</b>	<i>normalizačně žíháno</i>
<b>3</b>	<i>kaleno</i>
<b>4</b>	<i>popouštěno na 380°C</i>
<b>5</b>	<i>popouštěno na 480°C</i>
<b>6</b>	<i>popouštěno na 580°C</i>

Z každého typu vzorku byl vyhotoven metalografický výbrus a změřena jeho tvrdost a mikrotvrdost. Prostřednictvím optického mikroskopu se pořídily snímky jednotlivých strukturních stavů. Tímto se získaly informace o struktuře každého vzorku. Dalším krokem bylo změření vzorků metodou Barkhausenova šumu. K ověření platnosti výsledků naměřených Barkhausenovou metodou byla použita metoda magnetické skvrny. Ze získaných dat se posuzoval vliv jednotlivých struktur na intenzitu Barkhausenova šumu.

## 5.1 Charakteristika hodnocené oceli 14 260 (54SiCr6)

Chrom-křemíková ocel na pružiny silničních a kolejových vozidel, ventilové pružiny pístových motorů a jiné pružné elementy s možností použití do 300 °C. Tepelně mechanicky zpracované tlusté plechy jsou vhodné na rovinné součásti vyžadující odolnost proti opotřebení, jako vyložení skluzů, obložení aktivních částí stavebních a zemědělských strojů. Nelze je svařovat a tvarovat, obrobiteľnosť je obtížná [20].

### Výsledky spektrální analýzy vzorku:

K analýze byl použit optický emisní spektroskop ARC-MET.

Tabulka 6.2: Procentuální zastoupení prvků v testované oceli 14 260:

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo
96,31	0,61	1,43	0,71	0,62	0,064	0,059	0,0035

V	W	Al	Nb	Ti	B	P	S
0,0018	0,070	0,022	0,023	0,0061	0,0020	0,012	0,020

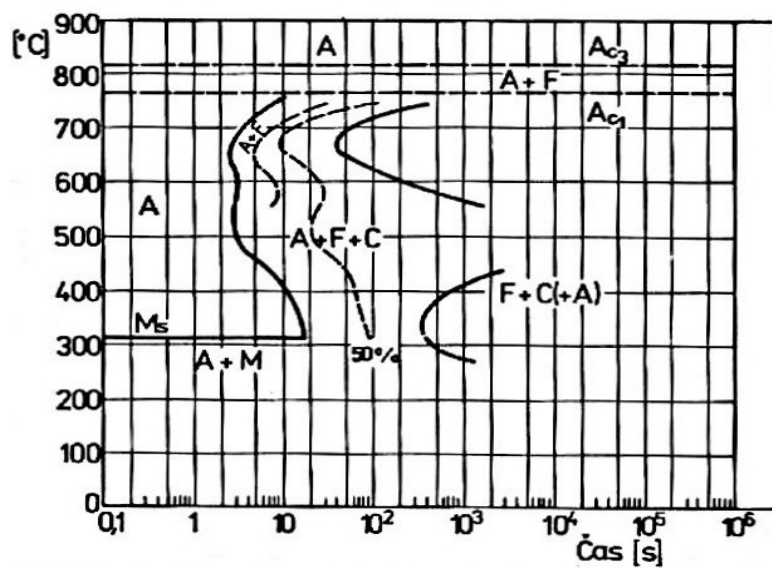
Tabulka 6.3: Informativní údaje [20]

<b>Modul pružnosti E [GPa]</b>	200		
<b>Modul pružnosti ve smyku G [GPa]</b>	78,5		
<b>Teploty přeměn [°C]</b>	A <sub>c1</sub>	A <sub>c3</sub>	M <sub>s</sub>
	~ 765	~ 815	~ 310

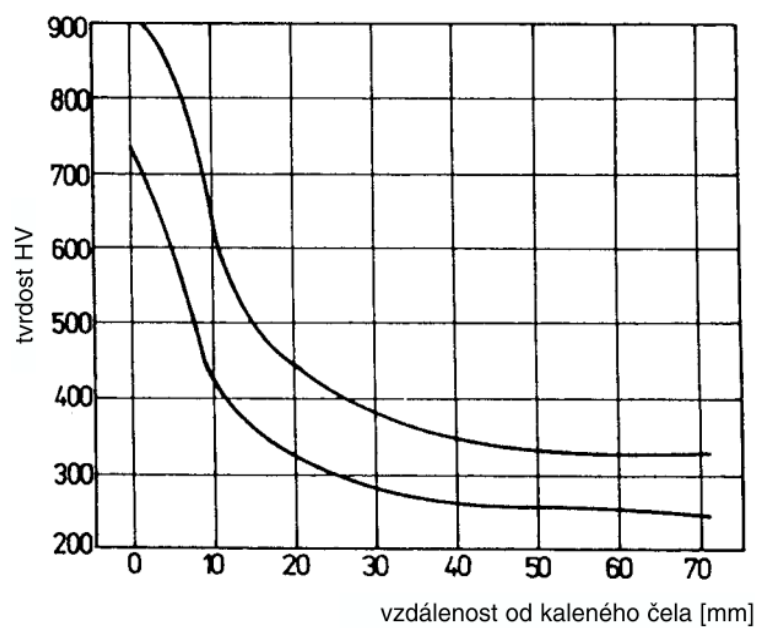
Tabulka 6.4: Doporučené údaje pro tepelné zpracování [20]

Zpracování	Teplota [°C]	Postup
Normalizační žíhání	850 – 890 °C	pomalou ochlazovat na vzduchu
Žíhání na měkko	710 – 750 °C	prodleva na teplotě asi 4 h., pomalou ochlazovat v peci
Kalení	840 – 880 °C	olej
Popouštění	380 – 580 °C	ochlazovat na vzduchu

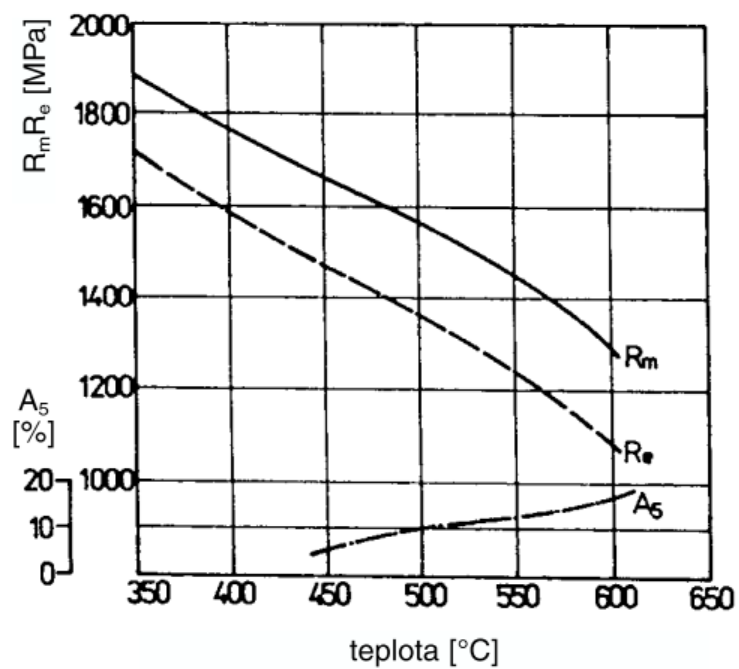




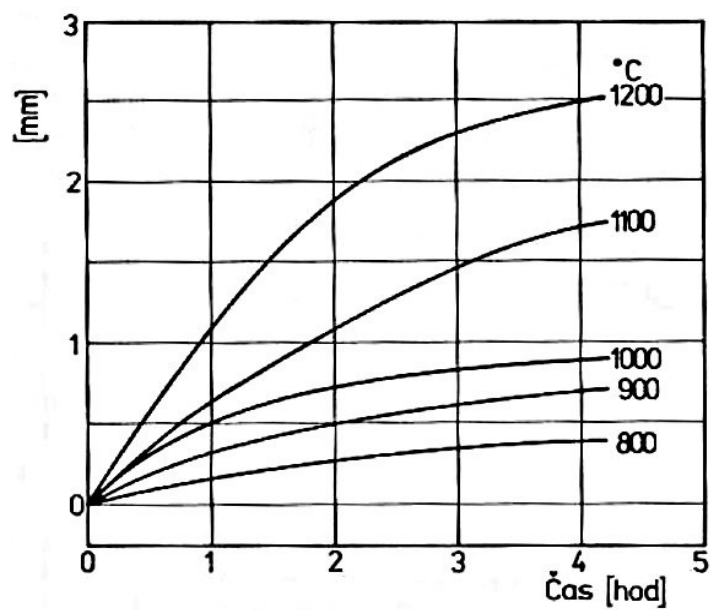
Obr. 6.1: Izotermický rozpad austenitu oceli 14 260 [20]



Obr. 6.2: Pás prokalitelnosti oceli 14 260 [20]



Obr. 6.3: Závislost mechanických vlastností na popouštěcí teplotě oceli 14 260 [20]



Obr. 6.4: Hloubka nauhlíčení v závislosti na teplotě, ocel 14 260 [20]

## 5.2 Tepelné zpracování vzorků

Před tepelným zpracováním byly vzorky z důvodu ochrany proti nežádoucím účinkům kyslíku natřeny ochranným nátěrem na bázi toulenu. K tepelnému zpracování vzorků byla použita elektrická komorová pec. Teploty jednotlivých typů provedeného tepelného zpracování jsou uvedeny v tabulce 6.5. Vzhledem k citlivosti Barkhausenova šumu na integritu povrchu po broušení se povrch vzorků po tepelném zpracování nebrousil, ale pouze šetrně okartáčoval.

Tabulka 6.5: Popis tepelného zpracování vzorků

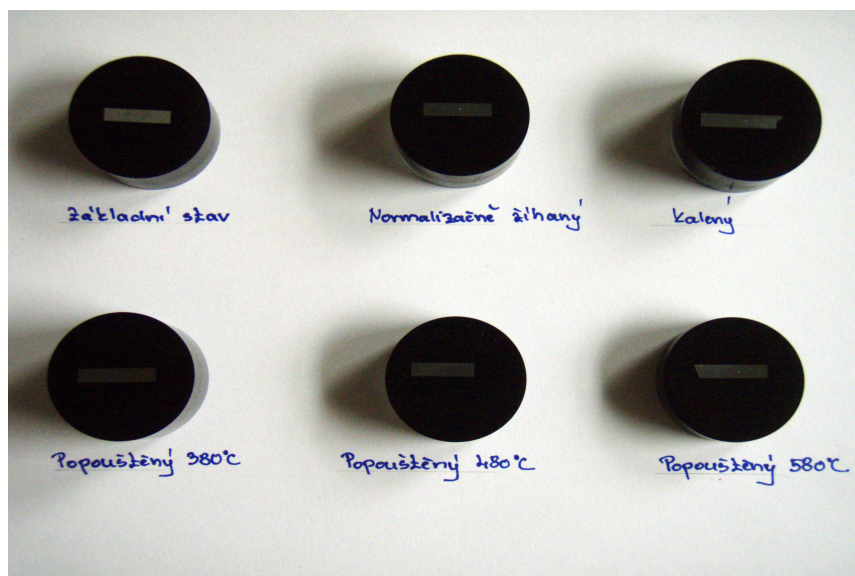
VZOREK	DRUH TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	TEPLOTA [°C]	Ochlazovací médium
1	Základní stav (vyžháno na měkko)	-	-
2	Normalizační žhání	850	vzduch
3	Kalení	850	olej
4	Popouštění	380	vzduch
5	Popouštění	480	vzduch
6	Popouštění	580	vzduch



Obr. 6.5: Vzorky oceli 14 260

### 5.3 Příprava metalografických výbrusů a studium struktury

Na rozbrušovací pile byly připraveny vzorky pro metalografický výbrus. Všechny vzorky se označily a zalisovaly do dentakrylu. Nasledovalo broušení vzorků, které se následně očistily v ultrazvukové vaně. Poté následovalo leštění, čištění denaturovaným lihem a sušení vzorků. Po vyleštění následovalo opatrné leptání pomocí 3% Nitalu.

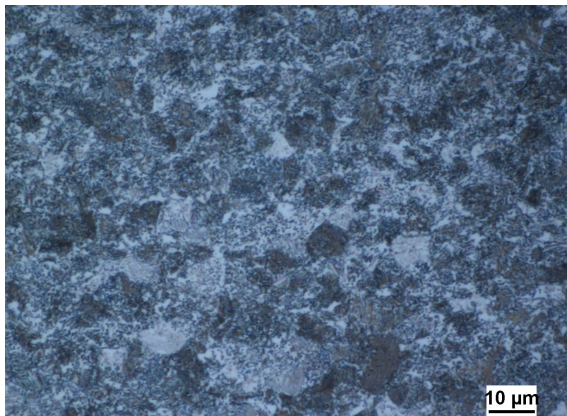


Obr. 6.6: Dokončené metalografické výbrusy

Takto připravené vzorky byly podrobeny analýze pomocí optického mikroskopu. Snímky metalografických struktur všech vzorků, spolu s jejich popisem jsou uvedeny na obrázcích 6.7 až 6.12. Pomocí mikroskopu bylo také zjištěno poměrně znatelné oduhličení povrchu u všech vzorků.



Ocel 14 260 v základním stavu (žíhaná na měkko), zv. 1000x



Obr. 6.7

Struktura obsahuje zrna lamelárního a přechodového perlitu, jen místy došlo k sferodizaci lamel. Zpracování odpovídá ne zcela dokonalému měkkému žíhání.

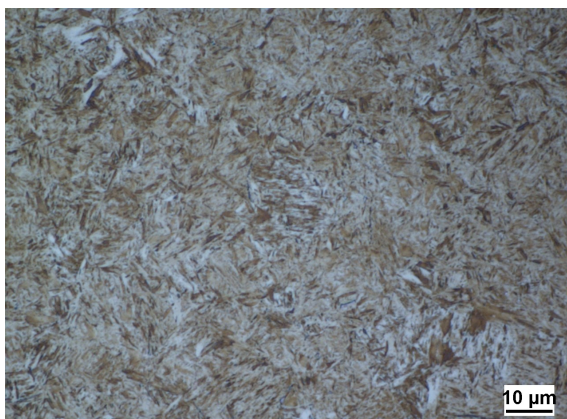
Ocel 14 260, normalizačně žíháno 850°C / 0,5 h / vzduch, zv. 1000x



Obr. 6.8

Struktura obsahuje výrazná feritická zrna a přechodový perlit bez patrných lamel (zřejmě důsledek rychlejšího ochlazení)

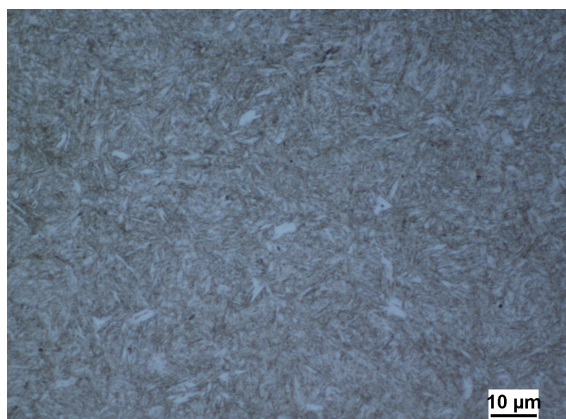
Ocel 14 260, kaleno 850°C / 0,25 h / olej, zv. 1000x



Obr. 6.9

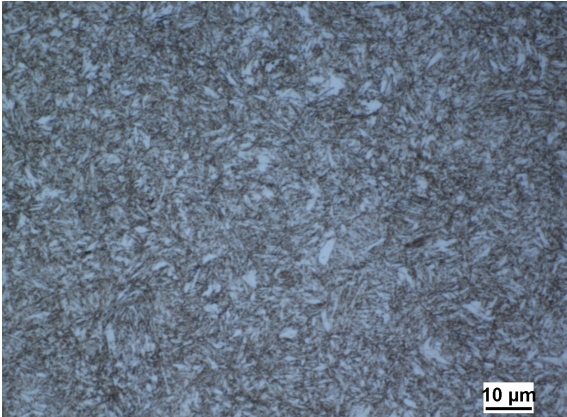
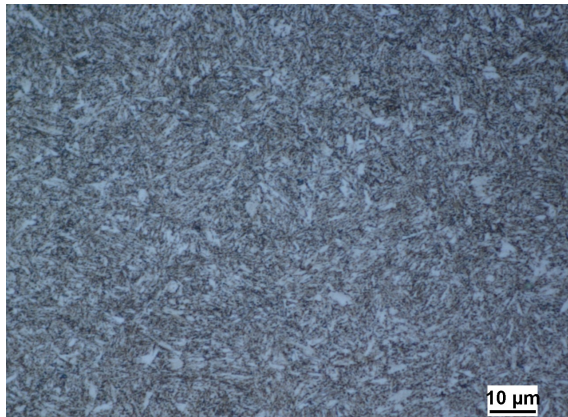
Struktura je martenziticko-bainitická, převládá martenzit

Ocel 14 260, popouštěno 380°C / 2 h / vzduch, zv. 1000x



Obr. 6.10

Jehlice martenzitu jsou rozpadlé, patrný počátek sferodizace martenzitu

<p><i>Ocel 14 260, popouštěno 480°C / 2 h / vzduch, zv. 1000x</i></p>  <p><i>Obr. 6.11</i> <i>Rozpad martenzitu je znatelnější, patrná sorbitická struktura</i></p>	<p><i>Ocel 14 260, popouštěno 580°C / 2 h / vzduch, zvětšeno 1000x</i></p>  <p><i>Obr. 6.12</i> <i>Znatelný rozpad martenzitu, sorbitická struktura</i></p>
--	---

## 5.4 Měření tvrdosti vzorků

U metalografických výbrusů byla změřena a porovnána tvrdost s mikrotvrdostí metodou podle Vickerse. Zatížení materiálu indentorem bylo zvoleno na hodnotu  $HV_{10}$ , u mikrotvrdosti 10N. Jednotlivé výsledky měření jsou tabulkově zpracovány v příloze číslo 1. Střední hodnoty jsou statisticky zpracovány v tabulce 6.6.

*Tabulka 6.6: Střední hodnoty mikrotvrdosti a tvrdosti vzorků*

<b>VZOREK</b>	<b>MIKROTVRDOST [HV - 10N]</b>	<b>TVRDOST [<math>HV_{10}</math>]</b>
<i>Základní stav</i>	$283 \pm 2$	$264 \pm 26$
<i>Normalizačně žíhaný</i>	$387 \pm 10$	$335 \pm 2$
<i>Kalený</i>	$915 \pm 16$	$786 \pm 4$
<i>Popouštěný na 380°C</i>	$662 \pm 6$	$571 \pm 3$
<i>Popouštěný na 480°C</i>	$534 \pm 4$	$455 \pm 4$
<i>Popouštěný na 580°C</i>	$441 \pm 8$	$371 \pm 2$



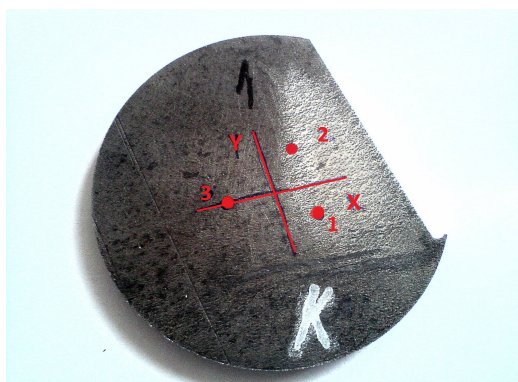
## 5.5 Měření Barkhausenova šumu

K měření byl použit digitální analyzátor Barkhausenova šumu Rollscan 300. Přístroj je navržen pro rychlou kontrolu kvality povrchu a podpovrchových vad týkajících se změn v napětí a mikrostruktuře v široké řadě strojírenských materiálů. Díky široké řadě dostupných snímačů se jedná o velmi flexibilní přístroj. Je vhodný k testování pístních čepů, ozubení, ložiskových kroužků a válečků, pro vačkové a klikové hřídele atd.



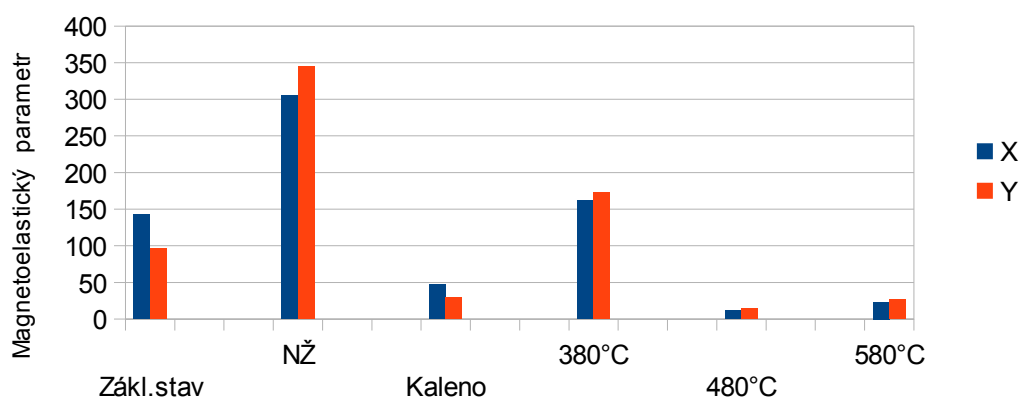
Obr. 6.13: Čelní panel Rollscanu 300 a jeden z možných snímačů [21], [14]

Měření probíhalo tak, že na každém vzorku se označily 3 různé body. V každém bodě se provádělo 5 měření, zvlášť pro směr osy X a Y. Výsledkem tedy bylo pro každý vzorek 15 hodnot, vyhotovených z různých oblastí vzorku, v různém směru. Měření magnetoelastického parametru bylo provedeno jak pro výchozí vzorky, tak pro metalografické výbrusy. Přehled je uveden v grafech 6.1 a 6.2. Statisticky zpracované výsledky magnetoelastických parametrů jsou v tabulkách 6.7 a 6.8. Soubor všech naměřených hodnot je uveden v příloze číslo 2.



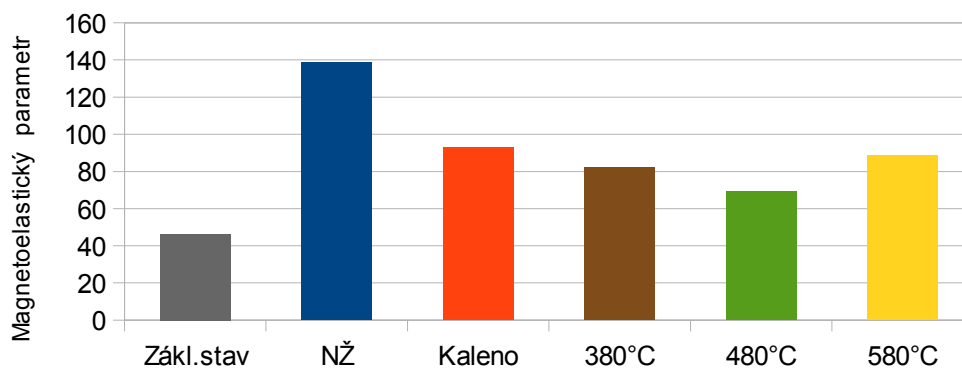
Obr.6.14: Označení bodů na vzorku

### Magnetoelastické parametry vzorků v osách x,y



Graf 6.1

### Magnetoelastické parametry metalografických výbrusů



Graf 6.2

Tabulka 6.7: Střední hodnoty magnetoelastických parametrů vzorků

Vzorek	Magnetoelastický parametr	
	Osa X	Osa Y
Základní stav	142,5 ± 14	96,4 ± 27
Normalizačně žíhaný	305,3 ± 14	344,7 ± 8
Kalený	47,8 ± 20	29,3 ± 4
Popouštěný na 380°C	161,4 ± 45	173,2 ± 36
Popouštěný na 480°C	11,7 ± 1	14,4 ± 5
Popouštěný na 580°C	23,5 ± 8	26,6 ± 10



Tabulka 6.8: Střední hodnoty magnetoelastických parametrů u výbrusů

Vzorek	Magnetoelastický parametr
Základní stav	$46,3 \pm 8$
Normalizačně žíhaný	$138,5 \pm 3$
Kalený	$93 \pm 20$
Popouštěný na 380°C	$82,2 \pm 5$
Popouštěný na 480°C	$69,3 \pm 10$
Popouštěný na 580°C	$88,6 \pm 16$

## 5.6 Měření metodou magnetické skvrny

K měření byl použit digitální přístroj DOMENA B3 využívající metody magnetického bodového pólu. Příložná sonda, standardně průměru 21 mm změří intenzitu remanentního magnetického pole kontrolovaného objemu materiálu (do hloubky cca 5 mm) součásti jejíž hodnota přímo závisí např. na množství a disperzi perlitu, či hloubce prokalení.

Měřicí přístroj používá k měření Hallovu sondu, která zmagnetuje větší plochu materiálu. Z tohoto důvodu se na vzorcích neproměřovalo více bodů, jako tomu bylo při měření Barkhausenova šumu. Vzorek byl nejprve vystaven slabé magnetizaci, při které se odměřily dvě hodnoty. Další dvě hodnoty se odměřily v režimu silné magnetizace. Přehled výsledků je uveden v tabulce 6.24 a 6.25. Názorněji v grafech 6.3 až 6.10.



Obr. 6.15: Přístroj DOMENA B3

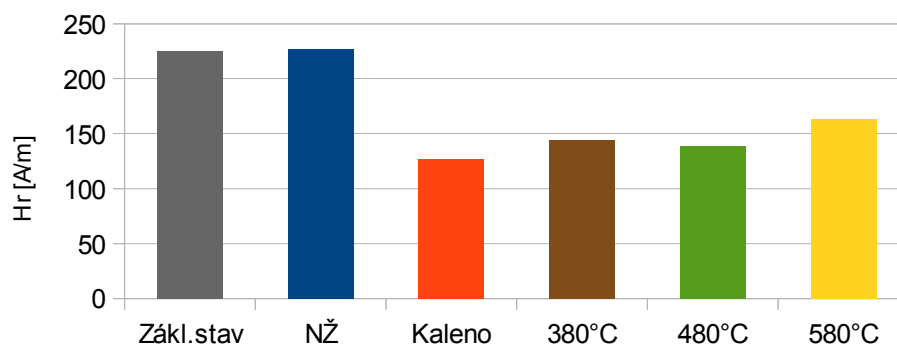
Tabulka 6.9: Hodnoty intenzity zbytkového mag. pole vzorků [A/m]

STAV	SLABÁ MAGNETIZACE		SILNÁ MAGNETIZACE	
	$M_{2_1}$	$M_{2_2}$	$M_{8_1}$	$M_{8_2}$
Základní stav	225	214	823	801
Kaleno	127	109	725	644
Norm. žíhání	227	216	572	546
Pop. 380°C	144	131	505	471
Pop. 480°C	139	132	583	546
Pop. 580°C	163	148	703	661

Tabulka 6.10: Rozdíly magnetizací [A/m]

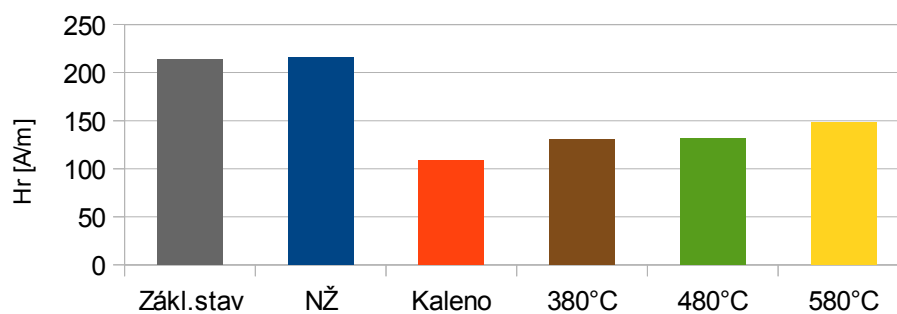
STAV	$M_{2_1} - M_{2_2}$	$M_{8_1} - M_{8_2}$	$M_{8_2} - M_{2_2}$
Základní stav	11	22	587
Kaleno	18	81	535
Norm. žíhání	11	26	330
Pop. 380°C	13	34	340
Pop. 480°C	7	37	414
Pop. 580°C	15	42	513

Slabá magnetizace vzorků -  $M_{2_1}$



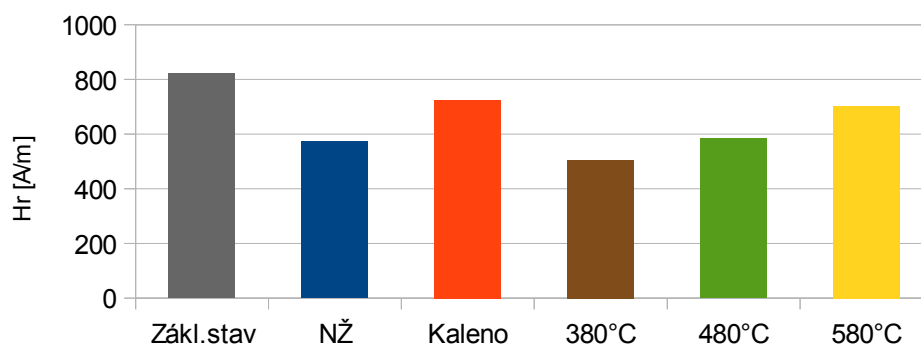
Graf 6.3

### Slabá magnetizace vzorků - M2(1)



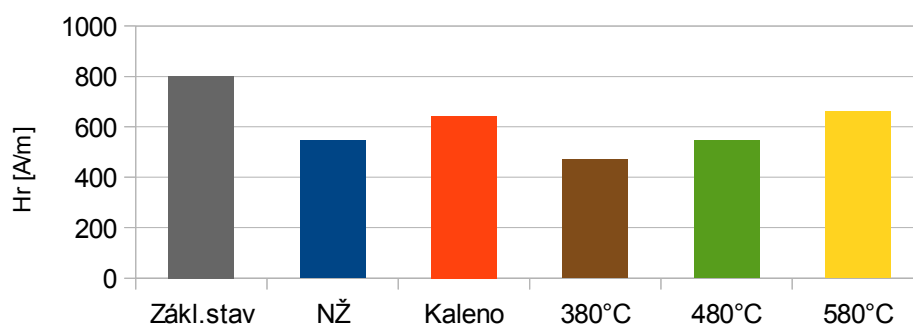
Graf 6.4

### Silná magnetizace vzorků - M8(1)

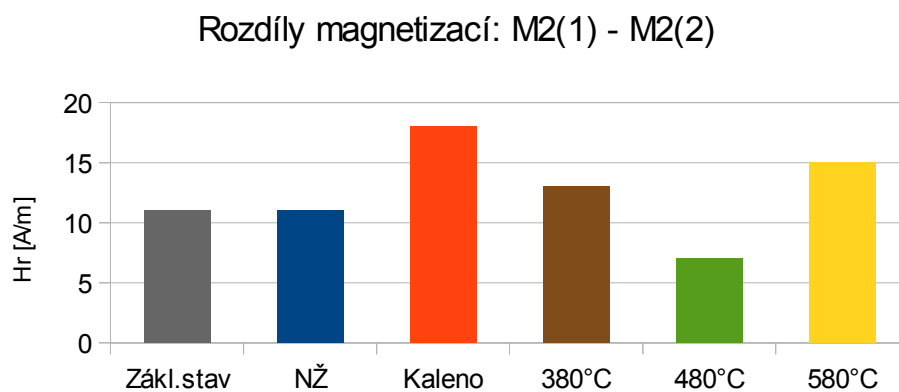


Graf 6.5

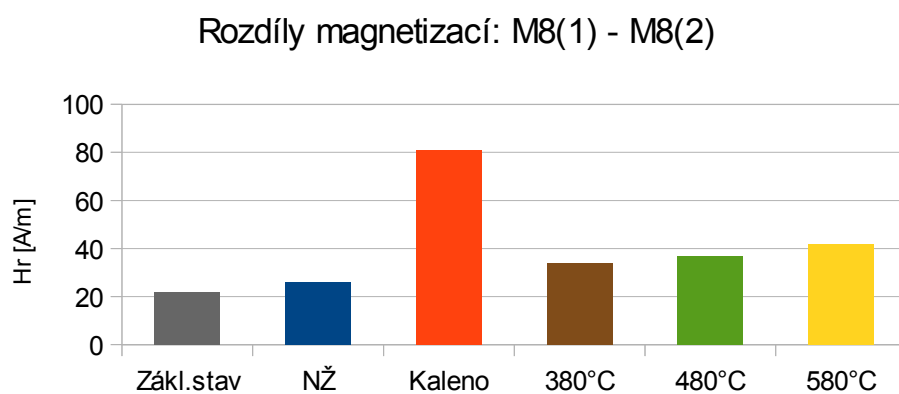
### Silná magnetizace vzorků - M8(2)



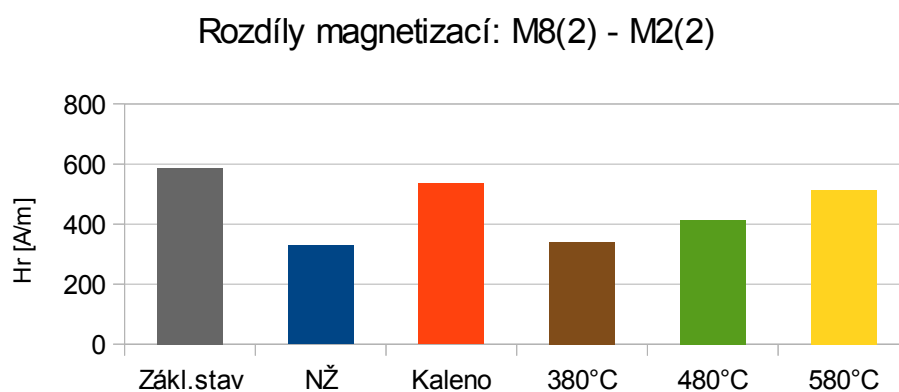
Graf 6.6



Graf 6.7



Graf 6.9



Graf 6.10

## 6. Diskuze výsledků a jejich shrnutí

Práci provázelo nejprve nastudování potřebných informací z oblasti problematiky nedestruktivního hodnocení materiálů. Zejména metodu analýzy Barkhausenova šumu a magnetických strukturoskopických metod. Následovalo zvolení materiálu a metodiky studia jeho struktury pomocí metody analýzy Barkhausenova šumu.

Pro hodnocení změn struktury oceli byla vybrána ocel ČSN 14 260 (EN 54SiCr6). Vzorky z této oceli byly různě tepelně zpracovány. Zjištění strukturního stavu vzorků bylo provedeno pomocí optické mikroskopie, dále se měřila tvrdost a mikrotvrdost. U každého vzorku byly metodou analýzy Barkhausenova šumu naměřeny a statisticky zpracovány magnetoelastické parametry, které jsou názorně uvedené v grafech 6.1 a 6.2 a tabulkách 6.7 a 6.8. Soubor všech naměřených hodnot je uveden v příloze číslo 2.

K ověření platnosti naměřených výsledků byla zvolena metoda magnetické skvrny, při které se měřila hodnota zbytkové magnetizace vzorku po jeho zmagnetizování. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 6.9 a 6.10. Názorněji v grafech 6.3 až 6.10.

### **Výsledky měření Barkhausenova šumu:**

Hodnoty magnetoelastických parametrů naměřených na výchozích vzorcích (viz. graf 6.1) nevykazují souvislost s tvrdostí a nejsou tedy schopny spolehlivě rozlišit strukturní stav. Překvapivě nejvyšší hodnoty MP byly naměřeny u vzorku normalizačně žíhaného, nejmenší u vzorku popuštěného na 480°C. Zkreslení výsledků při měření na vzorcích by mohlo být ovlivněno oduhličenou vrstvou po tepelném zpracování.

Aby se eliminoval vliv oduhličení, bylo měření provedeno také na metalografických výbrusech (viz. graf 6.2). Zde dosahoval nejvyšších hodnot opět normalizačně žíhaný stav, naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny u vzorku v základním stavu. Výsledky z tohoto měření také nelze použít k rozlišení strukturního stavu materiálu.

### **Výsledky měření metodou magnetické skvrny:**

Z výsledků měření pomocí slabé magnetizace  $M_2$  (graf 6.3 a 6.4) je patrné, že slabá magnetizace nedokáže rozlišit žíhané stavy (normalizačně žíhaný a základní stav žíhaný na měkko). Silná magnetizace  $M_8$  (graf 6.5 a 6.6) a rozdíl magnetizací  $M_{8_2} - M_{2_2}$  (graf 6.10) dokázaly stavy žíhání spolehlivě rozlišit.

Kalený stav vykazuje nejmenší absolutní hodnoty při slabé magnetizaci. Popouštěné stavy vykazují většinou nepřímou úměrnost mezi tvrdostí a hodnotou intenzity zbytkového magnetického pole. Minimální hodnotu při popouštění na 480°C vykazuje měření  $M_{2_1} - M_{2_2}$  (graf 6.7). Závislost tvrdosti na magnetizmu kalených a popouštěných stavů jinak vykazuje vždy nemonotónní funkci s minimem při popouštění na 380°C.

### **Porovnání výsledků a další doporučení:**

V případě měření metodou Barkhausenova šumu by se měl magnetoelastický parametr s rostoucí tvrdostí materiálu snižovat. Naměřené výsledky však tuto skutečnost neprokázaly. Vysvětlením jsou nejspíše zbytková napětí, která ovlivňují velikost naměřených hodnot a jsou dána zpracováním vzorků, nebo jejich úpravou povrchu po tepelném zpracování. Experiment tedy prokázal vysokou citlivost Barkhausenova šumu na výchozí zpracování a s tím spojenou nutnost potřeby informací o způsobu výroby součástí.

Metoda magnetické skvrny dokáže analyzovat větší objem materiálu a naměřené hodnoty nejsou ovlivněny, jako v případě metody analýzy Barkhausenova šumu. Variací různého stupně magnetizace, či rozdílem magnetizací lze rozlišit strukturní stavy testovaných vzorků.

Doporučuje se tedy zopakování experimentu s úplnou znalostí historie zpracování materiálu, které má na intenzitu Barkhausenova šumu výrazný vliv. Ideálním postupem by bylo sledovat hodnoty magnetoelastických parametrů v jednotlivých krocích výroby zkoumaných vzorků.

## 7. Závěr

Ve své bakalářské práci jsem zpracoval řešerši problematiku nedestruktivního hodnocení vnitřní struktury materiálu. Navrhl jsem praktické ověření struktury po tepelném zpracování pomocí nedestruktivní metody analýzy Barkhausenova šumu. Jako referenční jsem použil metodu magnetické skvrny. Na základě experimentálních výsledků byla provedena diskuze a dospělo se k následujícím poznatkům:

- Metoda analýzy Barkhausenova šumu by měla být schopna rozlišit různé strukturní stavy oceli po tepelném zpracování. Naměřené hodnoty magnetoelastických parametrů u testovaných vzorků však nedokáží spolehlivě rozlišit strukturní stav. Důvodem je nejspíše obsah zbytkových napětí v materiálu, způsobený při zpracování vzorků, nebo při úpravě jejich povrchu po tepelném zpracování. Experiment tedy prokázal vysokou citlivost Barkhausenova šumu na zpracování vzorků a s tím spojenou nutnost potřeby informací o způsobu výroby celé součásti.
- Při použití metody magnetické skvrny lze variací různého stupně magnetizace, či rozdílem magnetizací rozlišit strukturní stavy tepelně zpracovaných vzorků.

Další doporučení k této problematice je zopakování experimentu s úplnou znalostí historie zpracování materiálu, které má na intenzitu Barkhausenova šumu výrazný vliv. Ideálním postupem by bylo sledovat hodnoty magnetoelastických parametrů v jednotlivých krocích výroby zkoumaných vzorků.

## 8. Literatura

- [1] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (Nauka o materiálu IV)*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2]: Princip kapilární zkoušky. [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.testinglab.cz/defekt03.php>>
- [3]: Princip mag. práškové metody. [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/clanky/Ocelovy-tubusovy-stozar/229#prettyPhoto>>
- [4]: Princip metody vířivých proudů. [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.olympus-ims.com/en/eddycurrenttesting/>>
- [5]: Princip prozařovací zkoušky. [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/rtg/k32.htm>>
- [6] BAKALOVÁ, Totka. *Vliv materiálových a technologických parametrů obrábění na napětí v povrchové rstvě a vlastnosti dynamicky namáhaných strojních součástí*.
- [7]: Princip odrazové metody zkoušky ultrazvukem. [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.testinglab.cz/defekt05.php>>
- [8]: Princip metody akustické emise. [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z WWW: <[http://www.uk.fme.vutbr.cz/www\\_uk/texty/vyzkum\\_unavove\\_vlastnosti\\_-\\_akusticka\\_emise](http://www.uk.fme.vutbr.cz/www_uk/texty/vyzkum_unavove_vlastnosti_-_akusticka_emise)>
- [9] SKRBK, Břetislav. *Metoda magnetické skvrny: teze profesorské přednášky*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, 31 s. ISBN 978-80-7372-428-3.
- [10] Strojírenská technologie: *Časopis pro vědu, výzkum a výrobu*, 2006, roč. 11., č. 3, s. 4-18. ISSN 1211-4162
- [11]: Uspořádání domén ve feromagnetické látce. [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z WWW: <[http://mineralogie.sci.muni.cz/kap\\_4\\_8\\_magnet/obrazek48\\_1.htm](http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_4_8_magnet/obrazek48_1.htm)>
- [12]: TRILLON, Adrien, François DENEUVILLE, Sébastien PETIT a Bernard BISIAUX. *Magnetic Barkhausen Noise for hardness checking on steel*. [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z WWW: <[http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/569\\_wcndtfinal00568.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/569_wcndtfinal00568.pdf)>



- [13]: Nauka o materiálu: *Přednáška č.8 - Zbytková napětí a defektoskopie*. [online] [cit. 2013-11-28]. Dostupné z WWW: <[http://www.339.vsb.cz/nauka\\_o\\_materialu/Slide8\\_ZbytkovaNapeti\\_NDT.pdf](http://www.339.vsb.cz/nauka_o_materialu/Slide8_ZbytkovaNapeti_NDT.pdf)>
- [14]: VRKOSLAVOVÁ, Lucie. *Zvyšování přesnosti a výzkum integrity povrchu součástí v automobilovém průmyslu: teze disertační práce*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012, 25 s.
- [15]: Zkoušky tvrdosti. [online]. [cit. 2013-02-17]. Dostupné z WWW: [http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
- [16]: Tvrdost strukturních složek, karbidů a fází oceli. [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Aplikace/Struktur%20slozky%20faze/struktslozky%20a%20faze.htm>>
- [17]: Teorie tepelného zpracování: *Kalení ocelí* [online]. [cit. 2013-02-19]. Dostupné z WWW: <[http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/TTZ/ttz%20Dad/kaloceli.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/TTZ/ttz%20Dad/kaloceli.pdf)>
- [18] VRKOSLAVOVÁ, L., GANEV, N., SANTA-AHO, S. aj. Comparative Study of Case-hardened and Nitrided Samples by Using Barkhausen Noise Analysis and X- Ray Diffraction. Rec. -, In: *9th International Conference on Barkhausen noise and Micromagnetic Testing*, str. 105 – 114, ISBN 978-952-67247-4-4.
- [19] VRKOSLAVOVÁ, L., BAKALOVÁ, T. Hodnocení zbytkových napětí metodou analýzy Barkhausenova šumu v porovnání s RTG difrakcí. *Jemná mechanika a optika*. 1/2013, s. 11 – 13, ISSN 0447-6441
- [20]: *Oceli: výrobní program, II. díl, svazek 2*. Praha: Generální ředitelství Hutnictví železa, 1980, 283 s.
- [21]: Rollscan 300: *Uživatelská příručka*, V1.6, Březen 2010

## **SEZNAM PŘÍLOH:**

PŘÍLOHA 1: Měření tvrdosti

PŘÍLOHA 2: Měření intenzity Barkhausenova šumu

PŘÍLOHA 3: Seznam použitých přístrojů a zařízení

## PŘÍLOHA 1: Měření mikrotvrdomosti (HV – 10N) a tvrdosti (HV<sub>10</sub>)

*Tvrdomost a mikrotvrdomost vzorku v základním stavu*

<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MIKROTVRDOMOST [HV]</b>	<b>TVRDOMOST [HV]</b>
1	285	294
2	281	249
3	282	248
Průměrná hodnota:	<b>283 ± 2</b>	<b>264 ± 26</b>
Průměr. hloubka vtisku:	12,7 µm	

*Tvrdomost a mikrotvrdomost vzorku normalizačně žíhaného*

<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MIKROTVRDOMOST [HV]</b>	<b>TVRDOMOST [HV]</b>
1	398	335
2	378	337
3	386	334
Průměrná hodnota:	<b>387 ± 10</b>	<b>335 ± 2</b>
Průměr. hloubka vtisku:	11,1 µm	

*Tvrdomost a mikrotvrdomost kaleného vzorku*

<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MIKROTVRDOMOST [HV]</b>	<b>TVRDOMOST [HV]</b>
1	917	782
2	929	788
3	898	789
Průměrná hodnota:	<b>915 ± 16</b>	<b>786 ± 4</b>
Průměr. hloubka vtisku:	7,9 µm	

*Tvrdomost a mikrotvrdomost vzorku popouštěného na 380°C*

<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MIKROTVRDOMOST [HV]</b>	<b>TVRDOMOST [HV]</b>
1	669	567
2	661	572
3	657	573
Průměrná hodnota:	<b>662 ± 6</b>	<b>571 ± 3</b>
Průměr. hloubka vtisku:	8,9 µm	

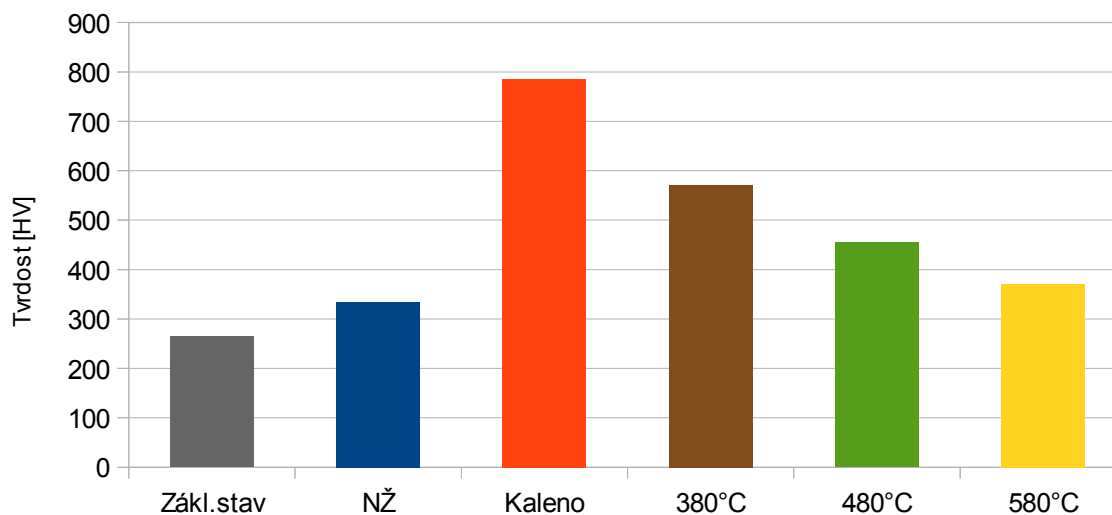
*Tvrдост a mikrotvrдост vzorku popouštěného na 480°C*

<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MIKROTVRĐOST [HV]</b>	<b>TVRĐOST [HV]</b>
1	536	460
2	537	453
3	530	452
Průměrná hodnota:	<b>534 ± 4</b>	<b>455 ± 4</b>
Průměr. hloubka vtisku:	9,7 μm	

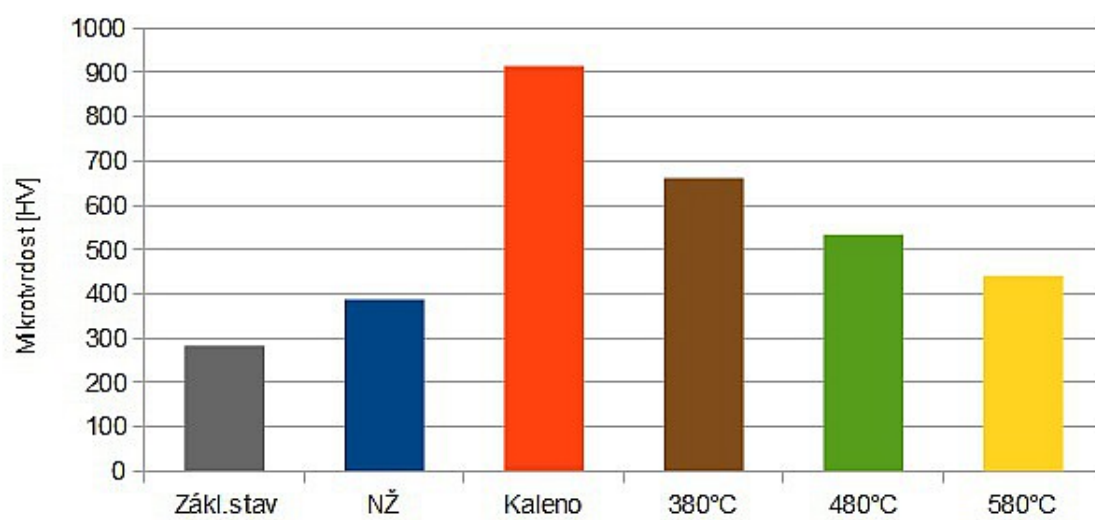
*Tvrдост a mikrotvrдост vzorku popouštěného na 580°C*

<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MIKROTVRĐOST [HV]</b>	<b>TVRĐOST [HV]</b>
1	450	368
2	437	372
3	436	372
Průměrná hodnota:	<b>441 ± 8</b>	<b>371 ± 2</b>
Průměr. hloubka vtisku:	10,5 μm	

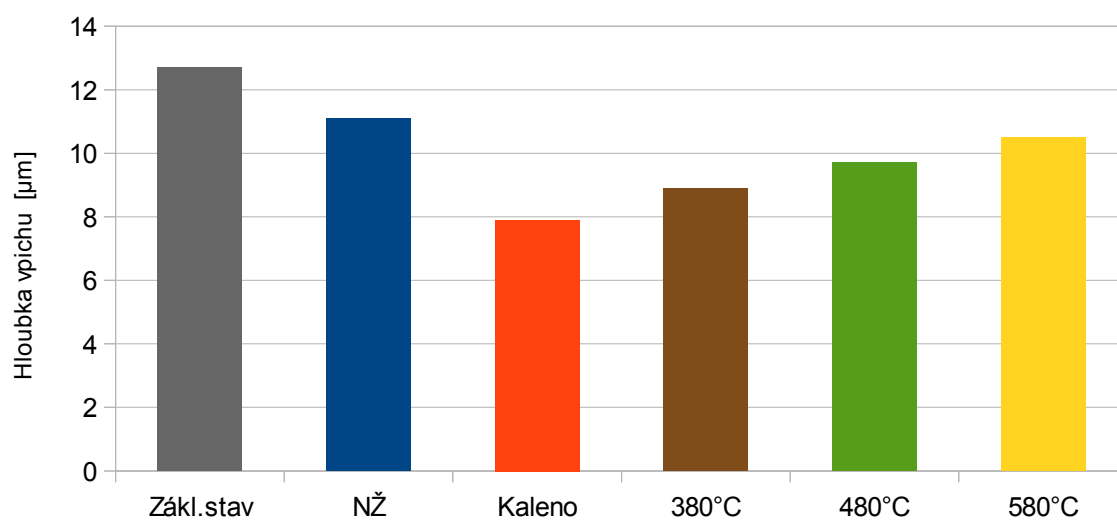
Tvrđosti jednotlivých vzorků



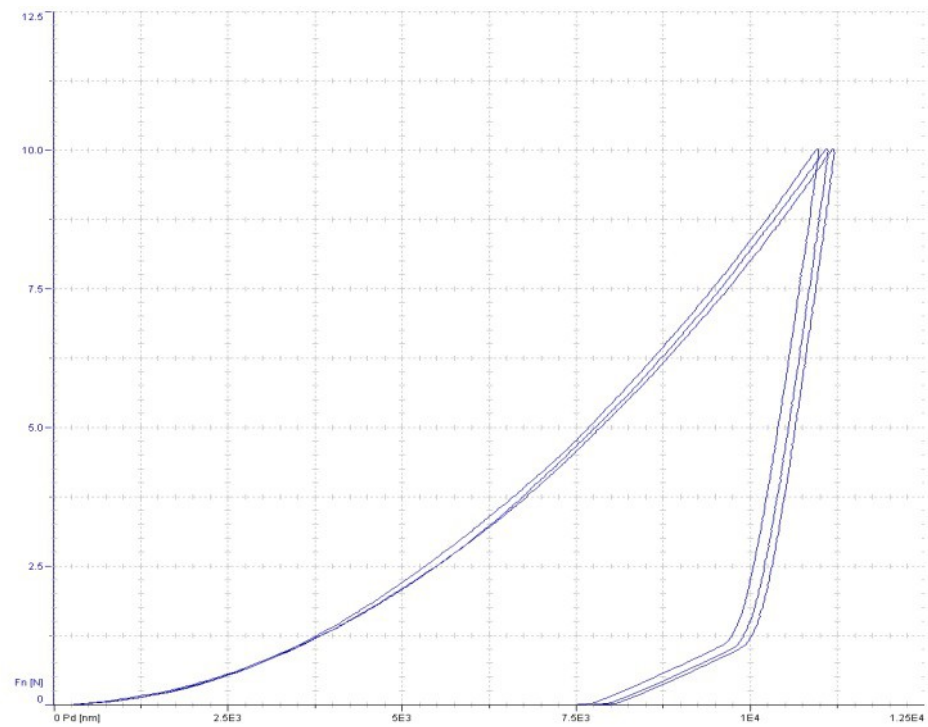
Mikrotvrdosti jednotlivých vzorků



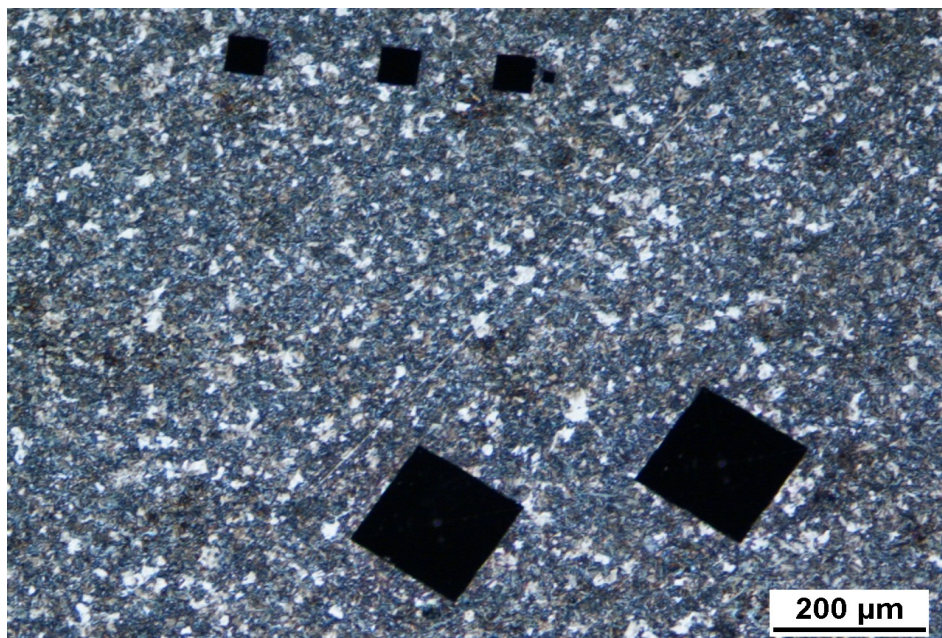
Hloubka vpichu indentoru



NZ -1 -  $F_n$  [N]  
NZ -3 -  $F_n$  [N]  
NZ -4 -  $F_n$  [N]



*Ukázka průběhu měření mikrotvrdosti (závislost zatěžovací síly na hloubce vtisku),  
normalizačně žíhaný vzorek*



*Vpichy od měření mikrotvrdosti a tvrdosti*

## PŘÍLOHA 2: Měření intenzity Barkhausenova šumu

### ZÁKLADNÍ STAV

OSA X		OSA Y	
MĚŘENÍ	MP	MĚŘENÍ	MP
Bod 1	134,3	Bod 1	69
	139,3		67,7
	139,3		68
	133,2		70,6
	126,6		69,4
Bod 2	127,9	Bod 2	130,1
	130		128,2
	132,5		130,3
	134,6		133,2
	135,5		130,3
Bod 3	159	Bod 3	92,3
	160,4		92,3
	161,8		90,9
	160,3		88,7
	163		84,4
<b>Průměr</b>	<b>142,5 ± 14</b>	<b>Průměr</b>	<b>96,4 ± 27</b>

### ZÁKLADNÍ STAV – metalografický výbrus

MĚŘENÍ	MP
1	52,7
2	55,4
3	43,9
4	37,1
5	42,5
<b>Průměr</b>	<b>46,3 ± 8</b>

# KALENÝ VZOREK

OSA X		OSA Y	
<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MP</b>	<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MP</b>
<i>Bod 1</i>	29	<i>Bod 1</i>	34
	28,8		34,3
	29,8		34,1
	29,6		33,7
	30,5		34
<i>Bod 2</i>	73,3	<i>Bod 2</i>	27
	72,8		27,3
	73,4		27,9
	71,8		28,2
	74,4		27,8
<i>Bod 3</i>	39,9	<i>Bod 3</i>	25,5
	40,7		26,2
	40,4		25,8
	41		26,5
	41,1		27
<b>Průměr</b>	<b>47,8 ± 20</b>	<b>Průměr</b>	<b>29,3 ± 4</b>

## KALENÝ VZOREK – metalografický výbrus

<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MP</b>
1	109,1
2	88,3
3	116
4	87,8
5	64
<b>Průměr</b>	<b>93 ± 20</b>



# NORMALIZAČNĚ ŽÍHANÝ VZOREK

OSA X		OSA Y	
<i><b>MĚŘENÍ</b></i>	<i><b>MP</b></i>	<i><b>MĚŘENÍ</b></i>	<i><b>MP</b></i>
<i>Bod 1</i>	323,1	<i>Bod 1</i>	359,8
	324,4		349,9
	320,5		356
	318		344,8
	314,7		356,6
<i>Bod 2</i>	286,9	<i>Bod 2</i>	341,5
	287,6		345,5
	290,6		345,7
	290,8		339,2
	286		343,3
<i>Bod 3</i>	312,2	<i>Bod 3</i>	333,7
	311,6		336,7
	304,2		336,4
	310,6		339,4
	398,9		341,7
<i><b>Průměr</b></i>	<b>305,3 ± 14</b>	<i><b>Průměr</b></i>	<b>344,7 ± 8</b>

## NORMALIZAČNĚ ŽÍHANÝ VZOREK – metalografický výbrus

<i><b>MĚŘENÍ</b></i>	<i><b>MP</b></i>
1	134,6
2	143,3
3	136,6
4	139,2
5	138,8
<i><b>Průměr</b></i>	<b>138,5 ± 3</b>

VZOREK POPOUŠTĚNÝ NA 380°C

OSA X		OSA Y	
<i><b>MĚŘENÍ</b></i>	<i><b>MP</b></i>	<i><b>MĚŘENÍ</b></i>	<i><b>MP</b></i>
<i>Bod 1</i>	189,3	<i>Bod 1</i>	152,1
	190,7		150
	193,1		149,6
	192,1		150,1
	193,9		150,1
<i>Bod 2</i>	101,7	<i>Bod 2</i>	162,6
	99,6		154,5
	99,6		142,8
	101,7		139
	100,7		137,9
<i>Bod 3</i>	199,3	<i>Bod 3</i>	218,2
	190		225,1
	186,1		222,7
	195,4		219,7
	187,6		224,1
<i><b>Průměr</b></i>	<b>161,4 ± 45</b>	<i><b>Průměr</b></i>	<b>173,2 ± 36</b>

VZOREK POPOUŠTĚNÝ NA 380°C – metalografický výbrus

<i><b>MĚŘENÍ</b></i>	<i><b>MP</b></i>
1	87,8
2	82,9
3	79,8
4	86,4
5	74,2
<i><b>Průměr</b></i>	<b>82,2 ± 5</b>

VZOREK POPOUŠTĚNÝ NA 480°C

OSA X		OSA Y	
<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MP</b>	<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MP</b>
<i>Bod 1</i>	12,4	<i>Bod 1</i>	9,9
	12		9,8
	12,1		9,8
	12,2		9,8
	12,2		9,8
<i>Bod 2</i>	12,2	<i>Bod 2</i>	20,6
	12,2		20,9
	12		21
	12,2		21
	12,1		20,8
<i>Bod 3</i>	10,7	<i>Bod 3</i>	11,6
	10,7		12,9
	10,9		12,8
	10,9		12,8
	10,9		12,6
<b>Průměr</b>	<b>11,7 ± 1</b>	<b>Průměr</b>	<b>14,4 ± 5</b>

VZOREK POPOUŠTĚNÝ NA 480°C – metalografický výbrus

<b>MĚŘENÍ</b>	<b>MP</b>
1	55,6
2	67,5
3	70,3
4	68,3
5	84,6
<b>Průměr</b>	<b>69,3 ± 10</b>

VZOREK POPOUŠTĚNÝ NA 580°C

OSA X		OSA Y	
<i><b>MĚŘENÍ</b></i>	<i><b>MP</b></i>	<i><b>MĚŘENÍ</b></i>	<i><b>MP</b></i>
<i>Bod 1</i>	26,6	<i>Bod 1</i>	39,9
	26,4		39,8
	25,9		40,3
	26,7		40
	26		40
<i>Bod 2</i>	30,8	<i>Bod 2</i>	20,6
	30,7		20,6
	30,4		20,6
	30,8		20,5
	30,5		20,6
<i>Bod 3</i>	13,4	<i>Bod 3</i>	18,8
	13,4		19,1
	13,2		19,3
	13,6		19
	13,4		19,1
<i><b>Průměr</b></i>	<b>23,5 ± 8</b>	<i><b>Průměr</b></i>	<b>26,6 ± 10</b>

VZOREK POPOUŠTĚNÝ NA 580°C – metalografický výbrus

<i><b>MĚŘENÍ</b></i>	<i><b>MP</b></i>
1	78,1
2	85,7
3	83,2
4	80
5	116,1
<i><b>Průměr</b></i>	<b>88,6 ± 16</b>

### **PŘÍLOHA 3: Seznam použitých přístrojů a zařízení**

#### **Použité přístroje a zařízení:**

- ROLLSCAN 300
- DOMENA B3
- Světelný mikroskop Nikon EPIPHOT 200, software NIS-Elements AR 3.1
- Elektrická komorová pec
- Rozbrušovací pila DELTA Abrasimet Cutter, firma Buehler
- Přístroj pro zalisování vzorku do dentakrylu: Simplimet 100
- Metalografické brusky Buehler Alpha
- Leštička metalografických vzorků MHT
- Tvrdoměr ZWICK 3212
- Mikro/nano tvrdoměr, firma CSM